

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID



INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL
MECÁNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UN
VEHÍCULO AUTOMÓVIL EQUIPADO CON
AMORTIGUACIÓN MAGNETO-REOLÓGICA

Autora: D^a Gema Medina Pavón

Tutora: Dra. D^a M^a Jesús López Boada

Septiembre 2011

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Introducción	2
1.2. Objetivos del proyecto	3
1.3. Estructura del proyecto	4
CAPÍTULO 2. SISTEMA DE SUSPENSIÓN	5
2.1. Introducción	6
2.2. Características de un sistema de suspensión.....	6
2.3. Elementos de un sistema de suspensión	7
2.3.1. Elementos elásticos de la suspensión	7
2.3.1.1. Ballestas.....	7
2.3.1.2. Barras de torsión.....	8
2.3.1.3. Muelles helicoidales	9
2.3.2. Elementos de amortiguación de la suspensión	10
2.3.2.1. Amortiguador de fricción	11
2.3.2.2. Amortiguador hidráulico telescópico	12
2.3.3. Otros elementos de la suspensión.....	14
2.3.3.1. Barras estabilizadoras	14
2.3.3.2. Casquillos o <i>silentblocks</i>	15
2.4. Tipos de sistemas de suspensión.....	16
2.4.1. Atendiendo a geometría.....	16
2.4.1.1. Suspensión indepediente.....	17
2.4.1.2.. Suspensión rígida	22
2.4.1.3. Suspensión semirrígida	23
2.4.2. Atendiendo al sistema de control.....	25
2.4.2.1. Suspensión pasiva	25
2.4.2.2.. Suspensión activa	25

2.4.2.3.	Suspensión semiactiva	26
CAPÍTULO 3. REOLOGÍA		29
3.1.	Introducción	30
3.1.1.	Propiedades reológicas	30
3.1.2.	Aplicaciones de la Reología	32
3.2.	Los materiales inteligentes.....	33
3.2.1.	Materiales con memoria de forma	33
3.2.2.	Materiales piezoeléctricos y electrostrictivos	35
3.2.3.	Materiales foto y cromosactivos	35
3.3.	Fluidos magneto-reológicos.....	36
3.3.1.	Aplicaciones actuales	38
3.3.1.1.	Suspensión de asientos para vehículos de trabajo pesado	38
3.3.1.2.	Control de vibración sísmicas en estructuras	38
3.3.1.3.	Amortiguadores de vibración	39
3.3.1.4.	Prótesis médicas	40
3.3.1.5.	Suspensión pasiva	41
3.4.	Amortiguadores magneto-reológicos para suspensiones de vehículos.....	41
3.4.1.	Ventajas e inconvenientes	43
CAPÍTULO 4. EQUIPAMIENTO EMPLEADO EN ENTRADAS Y SALIDAS..		45
4.1.	Hardware.....	46
4.1.1.	Tarjetas DAQmx	46
4.2.	Software	48
4.2.1.	Adquisición y almacenamiento de la señal en LabVIEW	48
4.3.	Tipos de sensores empleados	51
4.4.	Calibración de sensores	53
4.5.	Kit controller.....	56

CAPÍTULO 5. ENSAYOS REALIZADOS.....	61
5.1. Introducción	62
5.2. Cableado y conexionado	62
5.3. Colocación de los equipos en el vehículo	65
CAPÍTULO 6. OBTENCIÓN DE RESULTADOS	67
6.1. Introducción	68
6.2. Tipos de ensayo	70
6.2.1. Ensayo sobre terreno adoquinado	70
6.2.2. Ensayo sobre badén.....	70
6.2.3. Ensayo sobre escalón	71
6.3. Obtención de resultados	72
6.3.1. Ensayo sobre escalón	72
6.3.2. Ensayo sobre escalón	74
6.3.3. Ensayo sobre escalón	76
6.3.4. Ensayo sobre escalón	78
6.3.5. Ensayo sobre escalón	80
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES	83
7.1. Conclusiones	84
7.2. Futuros estudios propuestos	85
ANEXO A. ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS	87
A.1. Introducción	88
A.2. Característicasdel amortiguador RD-1005.3 de Lord	88
A.3. Especificaciones de los equipos de National Instruments	91
A.3.1. Especificaiones de NI PXI 1031DC	92
A.3.2. Especificaiones de NI PXI 4472B	94
A.3.3. Especificaiones de NI PXI 6230.....	95
A.3.4. Especificaiones del Kit Controller.....	96

BIBLIOGRAFIA99

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1.1. Peugeot 207	3
Figura 2.1. Ballesta.....	8
Figura 2.2. Barra de torsión.....	8
Figura 2.3. Disposición y montaje de las barras de torsión.....	9
Figura 2.4. Muelle helicoidal.....	9
Figura 2.5. Tipos de muelles helicoidales	10
Figura 2.6. Amortiguador de fricción.....	11
Figura 2.7. Amortiguador hidráulico telescópico.....	12
Figura 2.8. Flujo de aceite a través de paso permanente.	12
Figura 2.9. Flujo de aceite a través de las válvulas de aceite por presión	12
Figura 2.10. Esquema simplificado de un amortiguador bitubo	13
Figura 2.11. Esquema simplificado de un amortiguador monotubo	14
Figura 2.12. Inclinación del vehículo al tomar una curva	14
Figura 2.13. Barra estabilizadora.....	15
Figura 2.14. Casquillos o <i>Silentblocks</i> montados en una suspensión.....	16
Figura 2.15. Suspensión independiente	17
Figura 2.16. Suspensión de eje oscilante.....	18
Figura 2.17. Detalle de un sistema de brazos arrastrados	18
Figura 2.18. Detalle de un sistema de “brazos semi-arrastrados”	19
Figura 2.19. Montaje de dos y cuatro barras de torsión	19
Figura 2.20. Suspensión tipo McPherson.....	20
Figura 2.21. Suspensión del paralelogramo deformable	21
Figura 2.22. Suspensión multibrazo de un eje delantero.....	22
Figura 2.23. Esquema de un sistema de suspensión rígido	22
Figura 2.24. Suspensión de eje rígido	23

Figura 2.25. Suspensión semirrígida con “eje de Dion”	24
Figura 2.26. Suspensión de “eje torsional”	24
Figura 2.27. Esquema de una suspensión pasiva.....	25
Figura 2.28. Esquema de una suspensión activa	26
Figura 2.29. Esquema de una suspensión semiactiva.....	27
Figura 2.30. Suspensión Four-C del volvo S60 R	28
Figura 3.1. Esfuerzo de corte en función de la densidad de flujo	31
Figura 3.2. Viscosidad como función de la velocidad de corte.....	32
Figura 3.3. Cambio de estructura cristalina en aleaciones con memoria de forma	34
Figura 3.4. Gráfica que relaciona el esfuerzo viscoso con la velocidad de deformación.....	36
Figura 3.5. Campo de velocidades en un fluido magnético	37
Figura 3.6. Amortiguador de fluido magneto-reológico Rheonetic RD-1001-4	38
Figura 3.7. Amortiguación sísmico Rheonetic MRD 9000.....	39
Figura 3.8. Amortiguación de vibraciones Rheonetic RD-1013-1	40
Figura 3.9. Prótesis con amortiguador magneto-reológico	40
Figura 3.10. Esquema de un freno rotativo magneto-reológico	41
Figura 3.11. Estructura de un amortiguador de Delphi	42
Figura 3.12. Audi R8 con sistema de suspensión <i>Magneti Ride</i>	43
Figura 4.1. Chasis NI PXI 1031DC.....	46
Figura 4.2. Módulo NI PXI 6230	47
Figura 4.3. Módulo NI PXI 4472B.....	47
Figura 4.4. Asistente DAQ	48
Figura 4.5. Selección tipo de señal	49
Figura 4.6. Selección de tarjeta y canal	49
Figura 4.7. Cuadro de ajustes DAQ.....	49
Figura 4.8. Recta de conversión V-cm	49
Figura 4.9. Definición gráfica adquisición de datos.....	50

Figura 4.10. Definición gráfica generación de señal	50
Figura 4.11. Selección canal de generación de señal	51
Figura 4.12. Sensor de desplazamiento LVDT MTN / E	51
Figura 4.13. Sensor de desplazamiento LVDT MTN / E	52
Figura 4.14. Linealidad sensor delantero derecho	55
Figura 4.15. Linealidad sensor delantero izquierdo	56
Figura 4.16. Lord Wonder Box Device controller Kit	57
Figura 4.17. Linealidad de la primera toma de datos	60
Figura 5.1. Conexiones realizadas en el módulo NI PXI 6230	63
Figura 5.2. Esquema de cableado y conexionado.....	64
Figura 5.3. Colocación del equipo controlador PXI.....	65
Figura 5.4. Colocación del regulador de tensión del amortiguador magneto-reológico .	66
Figura 5.5. Colocación de la pantalla, el teclado y el ratón.....	66
Figura 6.1. PSD de la señal original en el ensayo previo en badén.....	69
Figura 6.2. Comparación entre señal original y filtrada del ensayo previo en badén mediante filtro <i>Butterworth</i>	69
Figura 6.3. Ensayo sobre terreno adoquinado	70
Figura 6.4. Ensayo realizado sobre badén	71
Figura 6.5. Ensayo sobre escalón	71
Figura 6.6. Ensayo sobre terreno adoquinado a 20 Km/h y 0 V	72
Figura 6.7. Ensayo sobre terreno adoquinado a 20 Km/h y 1 V	72
Figura 6.8. Ensayo sobre terreno adoquinado a 20 Km/h y 2,5 V	73
Figura 6.9. Ensayo sobre terreno adoquinado a 20 Km/h y 5 V	73
Figura 6.10. Ensayo sobre terreno adoquinado a 30 Km/h y 0 V	74
Figura 6.11. Ensayo sobre terreno adoquinado a 30 Km/h y 1 V	74
Figura 6.12. Ensayo sobre terreno adoquinado a 30 Km/h y 2,5 V	75
Figura 6.13. Ensayo sobre terreno adoquinado a 30 Km/h y 5 V	75

Figura 6.14. Ensayo sobre terreno adoquinado a 40 Km/h y 0 V	76
Figura 6.15. Ensayo sobre terreno adoquinado a 40 Km/h y 1 V	76
Figura 6.16. Ensayo sobre terreno adoquinado a 40 Km/h y 2,5 V	77
Figura 6.17. Ensayo sobre terreno adoquinado a 40 Km/h y 5 V	77
Figura 6.18. Ensayo sobre escalón a 0 V	78
Figura 6.19. Ensayo sobre escalón a 1 V	78
Figura 6.20. Ensayo sobre escalón a 2,5 V	79
Figura 6.21. Ensayo sobre escalón a 5 V	79
Figura 6.22. Ensayo sobre badén a 0 V	80
Figura 6.23. Ensayo sobre badén a 1 V	80
Figura 6.24. Ensayo sobre badén a 2,5 V	81
Figura 6.25. Ensayo sobre badén a 5 V	81
Figura A.1. Gráfica Fuerza vs Velocidad del amortiguador RD-1005.3	90
Figura A.2. Vistas y medidas del amortiguador magneto-reológico	92

ÍNDICE TABLAS

Tabla 4.1. Relación de la longitud con la carrera del sensor de desplazamiento LVDT.	52
Tabla 4.2. Relación Voltaje/desplazamiento de datos del sensor delantero derecho	54
Tabla 4.3. Relación Voltaje/desplazamiento de datos del sensor delantero izquierdo....	55
Tabla 4.4. Relación voltaje/intensidad en la toma de datos	59
Tabla 6.1. Datos RMS amortiguador magneto-reológico en adoquinado a 20 Km/h	73
Tabla 6.2. Datos RMS amortiguador magneto-reológico en adoquinado a 30 Km/h	75
Tabla 6.3. Datos RMS amortiguador magneto-reológico en adoquinado a 40 Km/h	77
Tabla 6.4. Datos RMS amortiguador magneto-reológico para escalón.....	79
Tabla 6.5. Datos RMS amortiguador magneto-reológico para badén	81
Tabla 6.6. Datos RMS del amortiguador magneto-reológico en los diferentes ensayo .	82
Tabla A.1. Características del amortiguador RD-1005.3 de Lord.....	88

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Desde que surgieron los primeros vehículos automóviles la empresa automovilística ha experimentado una gran evolución a lo largo de la historia. Dicha evolución ha tenido como objetivos principales velar por la seguridad y confort de sus ocupantes así como la mejora en las prestaciones y la aerodinámica entre otros.

Teniendo en cuenta que la suspensión es uno de los elementos más importantes para conseguir y asegurar el confort y seguridad de sus ocupantes, este punto ha sido uno de los centros de atención de los fabricantes de vehículos automóviles realizando grandes mejoras sobre ello. Siempre teniendo en cuenta que confort y seguridad son dos conceptos que no guardan relación, con lo cual con la evolución de las suspensiones se pretende mejorar ambas características intentando no dejar a ninguna de ellas de lado.

En cuanto a las suspensiones reológicas constituyen un campo novedoso y moderno, en el cual se están generando grandes inversiones en las últimas décadas.

Por este motivo, se ha desarrollado el presente Proyecto Fin de Carrera que, mediante la instalación de un amortiguador magneto-reológico en la suspensión de un vehículo hemos estudiado cómo afecta su comportamiento en el comportamiento dinámico del vehículo.

A su vez, gracias a este estudio se pretende investigar las suspensiones semiactivas, ya que estas permiten una mejora de las prestaciones dinámicas del vehículo y un mayor confort para los pasajeros.

Para dicho estudio se ha instalado el amortiguador magneto-reológico en la suspensión delantera derecha del vehículo y mediante diferentes ensayos se ha llegado a comprobar el comportamiento del vehículo frente a diferentes situaciones. En los diferentes ensayos se ha variado entre distintos terrenos, a distintas velocidades y alimentando el amortiguador magneto-reológico con diferentes tensiones.

Dicho estudio nos brinda la oportunidad de, a la vez de ver el comportamiento dinámico del vehículo, observar el comportamiento de una suspensión convencional frente a una suspensión magneto-reológica.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El principal objetivo del presente proyecto final de carrera es la instalación de un amortiguador magneto-reológico RD-1005.3 de la empresa Lord en la suspensión de un vehículo y el estudio de cómo afecta su comportamiento en el comportamiento dinámico del mismo. Las especificaciones del presente proyecto se encuentran en el Anexo A.2.

El amortiguador a estudiar está instalado en la suspensión delantera derecha de un Peugeot 207 (Figura 1.1). El presente proyecto se ha realizado en el área de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid.

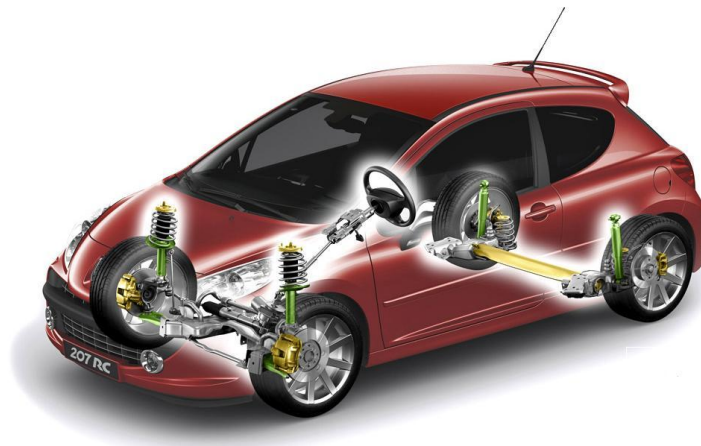


Figura 1.1. Peugeot 207

El amortiguador RD-1005.3 utilizado para la realización del presente proyecto, es un amortiguador magneto-reológico fabricado para la suspensión del asiento de un vehículo de gran tonelaje y por ello, ha sido necesario adaptarlo a la suspensión del vehículo automóvil empleado para la realización de ensayos.

Con el fin de estudiar el comportamiento dinámico del vehículo equipado con este tipo de suspensión, ha sido necesario la realización de diferentes ensayos. Con ello ha sido posible obtener datos concluyentes del amortiguador magneto-reológico y el amortiguador convencional y a su vez, poder observar ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos.

1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

El presente proyecto consta de ocho capítulos siendo el capítulo 1 la presente introducción.

En el capítulo 2, SISTEMA DE SUSPENSIÓN, se describe la evolución que ha sufrido el sistema de suspensión en la historia, así como los tipos y características de cada uno de ellos. Por otro lado, se describen los distintos elementos que lo componen. Por último, se hace una clasificación de los tipos de suspensiones.

En el capítulo 3, REOLOGÍA, se realiza una introducción a los fluidos reológicos y los materiales inteligentes. Teniendo en cuenta que el presente proyecto se centra en los amortiguadores que portan fluidos magneto-reológicos, se explica sus aplicaciones actuales a la vez que se detallan sus ventajas e inconvenientes.

En el capítulo 4, EQUIPAMIENTO EMPLEADO EN ENTRADAS Y SALIDAS, se explica las principales características del software empleado para la captación de datos. Al igual se realiza una breve introducción y explicación del modo de adquirir y generar señal.

En el capítulo 5, ENSAYOS REALIZADOS, se explica los ensayos realizados para la posterior adquisición y tratamiento de datos. Por otro lado, se realiza una breve explicación de colocación de los diferentes equipos dentro del vehículo, así como la alimentación de cada uno de ellos.

En el capítulo 6, OBTENCIÓN DE RESULTADOS, se adjuntan los datos adquiridos en los ensayos realizados, así como su posterior procesamiento.

En el capítulo 7, CONCLUSIONES, se realiza una breve conclusión de los datos y resultados obtenidos, al igual que se exponen unos futuros estudios.

En el Anexo A, ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS, se adjunta las especificaciones tanto del amortiguador magneto-reológico como los dispositivos empleados para la adquisición de datos.

CAPÍTULO 2

SISTEMA DE SUSPENSIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

La suspensión de un vehículo tiene como objetivo “absorber” las irregularidades del terreno sobre el que se desplaza, proporcionando un nivel mayor de confort y seguridad a los pasajeros y protegiendo las cargas y piezas del automóvil, a la vez que mantiene el contacto entre las ruedas y el pavimento asegurando la estabilidad del vehículo, ya que las fuerzas entre ambos elementos son las que permiten el control del mismo [1,2].

El peso del vehículo se descompone en dos partes, masa suspendida, que integra los elementos cuyo peso es soportado por el chasis o bastidor, y masa no suspendida, constituida por el resto de elementos que están en constante contacto con la calzada.

El sistema de suspensión se puede considerar como una parte de la masa no suspendida por medio de un elemento flexible (muelles de ballestas o helicoidales, barras de torsión, estabilizador, etc.) que se encarga tanto de amortiguar los golpes que las ruedas transmiten al bastidor, como los que el mismo peso del coche devuelve a las ruedas por la reacción.

Otra función del sistema de suspensión es la de proteger los órganos del vehículo, para ello la suspensión se diseña de tal manera que la energía sea absorbida por los elementos de amortiguación.

Por otro lado, además de estas funciones fundamentales el sistema de suspensión debe mantener la posición de los neumáticos y la geometría de la dirección en perfecto estado de funcionamiento respecto a la superficie de la carretera en tramos curvos, al igual que soportar el propio peso del vehículo.

2.2 CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN

Los elementos de una suspensión deben soportar todo el peso del vehículo, por ello deben ser resistentes para que las cargas que actúan sobre ellos no produzcan deformaciones permanentes. Por otro lado, también tienen que ser elementos muy elásticos para conseguir que el neumático no se separe del pavimento y salvar todas las irregularidades del terreno. Debido a las irregularidades citadas se producen en los elementos de la suspensión un conjunto de oscilaciones de intensidad decreciente hasta llegar a la posición de equilibrio de los elementos. Se ha demostrado que dichas oscilaciones deben ser correctamente amortiguadas debido a que pueden ocasionar incomodidades en los pasajeros del vehículo [2].

En cuanto a la influencia de la carga del vehículo en la suspensión, se podría decir que si las cargas fueran constantes se podría adaptar una suspensión ideal pero se sabe que esto no es así, con lo cual, hay que diseñar los elementos elásticos para que aguanten el peso máximo posible sin perder la elasticidad. Esta suspensión no es ideal ya que si se diseña para un peso mínimo resulta muy blanda cuando este aumenta, mientras que si se diseña para peso máximo resultaría excesivamente dura cuando el vehículo circulara sin carga.

2.3 ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN

En el sistema de suspensión se pueden distinguir dos componentes distintos, por un lado, los elementos elásticos y los elementos amortiguadores. Existen estos dos elementos ya que en la suspensión hay dos funciones principales, por un lado almacenar energía, la cual se encargan los elementos elásticos, y por otro lado, absorber energía, la cual se encargan los elementos amortiguadores.

2.3.1 ELEMENTOS ELÁSTICOS DE LA SUSPENSIÓN

Los elementos elásticos más comunes actualmente son: ballestas, muelles helicoidales y barras de torsión [2,3].

2.3.1.1. BALLESTAS

Las ballestas están formadas por un conjunto de láminas u hojas de acero especial para muelles, unidas mediante abrazaderas, que permiten el deslizamiento entre las hojas cuando estas se deforman por el peso que soportan (figura 2.1). La hoja superior, llamada hoja maestra, va curvada en sus extremos formando unos ojos en los que se montan unos casquillos de bronce o “*silentblocks*” para su acoplamiento al soporte del bastidor por medio de unos pernos o bulones. La segunda hoja puede ser de la misma longitud, las demás van disminuyendo su tamaño y siendo más curvadas.

El número de hojas y el espesor de las mismas van en función de la carga que han de soportar. Funcionan como los muelles de suspensión, haciendo el enlace entre el eje de las ruedas y el bastidor. Todas las hojas van unidas en el centro mediante un tornillo pasante con tuerca y se mantienen alineadas por abrazaderas para evitar que se abran en abanico.

La ballesta que presenta cierta curvatura, tiende a ponerse recta cuando sube la rueda debido a las irregularidades del pavimento, alargando esta su longitud.

Debido a este alargamiento su unión al chasis debe disponer de un dispositivo que permita el alargamiento de la ballesta.

Una de las características a destacar en las ballestas es su elevada rigidez, dependiendo esta del espesor y ancho de las hojas, así como el número de ellas utilizadas.



Figura 2.1. Ballesta

2.3.1.2. BARRAS DE TORSIÓN

El fundamento de las barras de torsión (figura 2.2) es como se indica a continuación: Si una barra de acero adecuada anclada en un extremo (F), se retuerce por el extremo libre (L), gira elásticamente sobre su eje como señalan las flechas de la figura, recuperando su estado primitivo en cuanto deja de aplicarse la torsión el extremo libre (L).

Hay que tener en cuenta que el esfuerzo aplicado no debe sobrepasar el límite elástico del material debido a que podría provocar una deformación permanente en el mismo.

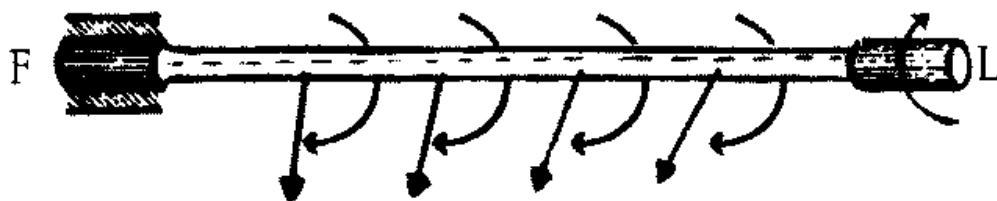


Figura 2.2. Barra de torsión

En cuanto al montaje de las barras de torsión, este se realiza fijando uno de sus extremos al chasis o carrocería, de manera que no pueda girar en su soporte, y en el otro extremo se coloca una palanca solidaria a la barra unida en su extremo libre al eje de la rueda (figura 2.3). Cuando la rueda se desplaza hacia arriba debido a las irregularidades del terreno, la barra se ve sometida a un esfuerzo de torsión que permite el movimiento de la rueda debido a su deformación elástica. Las barras de torsión se pueden disponer de dos maneras diferentes, de forma transversal a lo largo del bastidor y de forma paralela al eje longitudinal del bastidor.

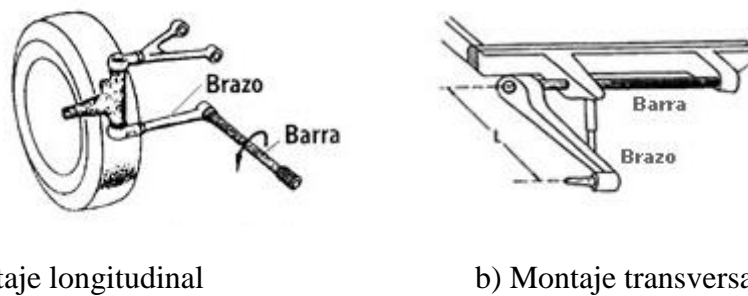


Figura 2.3. Disposición y montaje de las barras de torsión

2.3.1.3. MUELLES HELICOIDALES

Los muelles helicoidales consisten en un arrollamiento helicoidal de acero elástico formado con hilo de diámetro variable de entre unos 10 ó 15 mm, dicho diámetro depende de la carga que tengan que soportar (figura 2.4).

Las últimas espiras que constituyen el muelle son planas para asegurar su apoyo sobre una base.



Figura 2.4. Muelle helicoidal

La flexibilidad del muelle depende del número de espiras, del paso entre espiras, del espesor o diámetro del hilo, del diámetro del resorte y de las características del material. Variando sus características constructivas, se puede conseguir que la suspensión se comporte de maneras diferentes. Por ejemplo mediante el paso variable, la forma cónica o el empleo de cable de diámetro variable se puede obtener una rigidez progresiva (figura 2.5).



Figura 2.5. Tipos de muelles helicoidales

La principal ventaja de los muelles helicoidales frente a la ballesta es la ausencia casi total de fricción interna, lo cual permite confiar la absorción de energía al amortiguador, mucho más fácil de controlar. Por otro lado, los muelles también son mucho más eficientes a la hora de almacenar energía, pero necesitan reaccionar verticalmente ante sus puntos de anclaje.

2.3.2 ELEMENTOS DE AMORTIGUACIÓN DE LA SUSPENSIÓN

El amortiguador es el encargado de absorber las oscilaciones producidas por los elementos elásticos de la suspensión (muelles, ballestas), evitando así que lleguen a transmitirse a la carrocería, y a su vez, convirtiendo la energía absorbida de la masa oscilante en calor [1,4].

Los amortiguadores se colocan en las proximidades de las ruedas. Al pasar el vehículo sobre un obstáculo, por ejemplo un badén, la ballesta o el muelle se comprime intentando evitar que el bastidor se vea afectado, pero en el momento en que estos elementos vuelven a su posición inicial, debido a su elasticidad, la energía almacenada durante la flexión es la que produce el rebote y afecta al bastidor y por tanto, provoca oscilaciones que detectan los ocupantes del vehículo. Por este motivo, se instalan los amortiguadores que son los que tratan de frenar la separación de la ballesta o el muelle del bastidor.

El funcionamiento de un amortiguador es sencillo: un pistón unido a la carrocería a través de un vástago de fijación desliza en el interior de un cilindro unido a la rueda y lleno de fluido (aceite). Una serie de orificios calibrados en el pistón permite el paso del fluido entre las dos cámaras que queda dividido el cilindro, frenando así la oscilación de la carrocería.

Los amortiguadores se pueden clasificar en amortiguadores de fricción y amortiguadores hidráulicos. Dentro de los amortiguadores hidráulicos se describirán los hidráulicos telescópicos que engloban a su vez a los amortiguadores monotubo y bitubo.

2.3.2.1 AMORTIGUADOR DE FRICCIÓN

Los amortiguadores de fricción, poco usados en la actualidad, están compuestos por dos brazos articulados, uno que se sujeta al bastidor y el otro a la rueda o eje correspondiente. Cada brazo a su vez está constituido por láminas de acero que se reúnen en torno a un eje común, intercalándose entre ellas unos discos de fricción. Cuando la ballesta o el muelle se flexan y producen oscilaciones, los brazos del amortiguador se abren o cierran y se produce el frotamiento entre los discos de fricción que frenan dichas oscilaciones. En la figura 2.6 se puede ver un amortiguador de fricción [6].

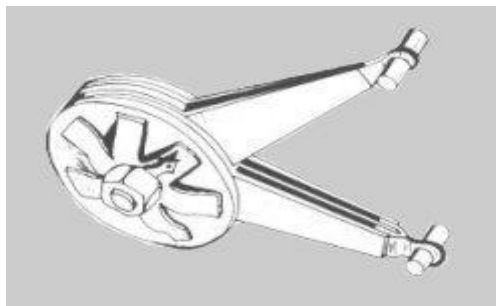


Figura 2.6. Amortiguador de fricción

Los amortiguadores de fricción presentan gran número de desventajas frente a los amortiguadores hidráulicos:

- Cuando no se supera la fuerza de fricción la suspensión queda bloqueada, y el vehículo queda sin suspensión.
- Una vez superada dicha fuerza de fricción la fuerza amortiguadora en vez de aumentar con la velocidad como sería deseable, disminuye.
- Su comportamiento se altera con el desgaste.
- Es necesario una revisión periódica para cambiar las piezas desgastadas.

2.3.2.2 AMORTIGUADOR HIDRÁULICO TELESCÓPICO

Desde hace algunos años aparecieron en la industria los amortiguadores hidráulicos, dentro de los cuales se engloba los de pistón, giratorios y telescópicos. Tanto los de pistón, como los giratorios prácticamente no se utilizan, los más utilizados hoy en día en la industria son los telescópicos, los cuales se estudiarán con más detalle a continuación. En estos, la fuerza amortiguadora es función creciente con la velocidad. En la figura 2.7 se puede ver la imagen de un amortiguador hidráulico telescópico [1,6].

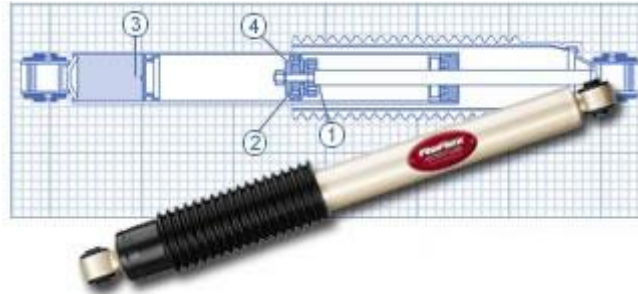


Figura 2.7. Amortiguador hidráulico telescópico

Los amortiguadores hidráulicos telescópicos constan básicamente de un pistón que trabaja dentro de un cilindro el cual contiene aceite. Cuando la presión supera un valor dado, el aceite pasa de un lado a otro del pistón por medio de una serie de orificios y válvulas precomprimadas que permiten dicho paso. Los orificios representan el paso permanente y las válvulas el paso de apertura por presión respectivamente.

El paso permanente vienen a ser orificios fijos que restringen el flujo del caudal. En el caso de las válvulas de apertura por presión, para que estas se abran es necesario ejercer sobre ellas una determinada presión y a medida que esta aumenta la apertura va siendo mayor. En las figuras 2.8 y 2.9 se pueden ver los dos pasos de flujo de aceite explicados anteriormente.



Figura 2.8. Flujo de aceite a través de paso permanente



Figura 2.9. Flujo de aceite a través de las válvulas de aceite por presión

Como se ha dicho anteriormente, los amortiguadores hidráulicos telescópicos engloban a los amortiguadores monotubo y bitubo. A continuación, se va a pasar a la explicación detallada de cada uno de ellos:

- **Amortiguador bitubo**

Los amortiguadores bitubo están compuestos por dos cámaras, una interior y otra de reserva. Hay válvulas en el pistón y válvulas en la base del amortiguador (válvula de pie). Este tipo de amortiguadores pueden ser no presurizados (aceite) o presurizados (aceite y gas). En la figura 2.10 se pueden ver las dos cámaras de las que está compuesto el amortiguador [6].

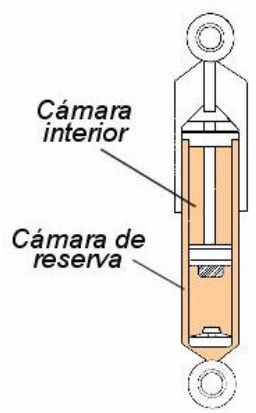


Figura 2.10. Esquema simplificado de un amortiguador bitubo

En este tipo de amortiguadores, al penetrar el vástago en el interior del cuerpo del amortiguador, el aceite contenido en la cámara interior fluye sin resistencia a través de los orificios del pistón hacia el espacio generado al otro lado del mismo. Del mismo modo, debido al volumen ocupado por el vástago en la cámara interior, una cierta cantidad de aceite se ve desplazada. Este aceite pasa a la cámara de reserva por la válvula de pie.

La fuerza de amortiguamiento viene dada por la resistencia que impone la válvula de pie al paso del aceite.

- **Amortiguador monotubo**

Los amortiguadores monotubo (figura 2.11) están constituidos por dos cámaras principales, una contiene gas a presión y otra contiene aceite, y están separadas por un pistón flotante que no posee válvulas, al contrario que el pistón principal.

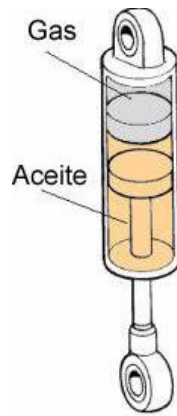


Figura 2.11. Esquema simplificado de un amortiguador monotubo

En los amortiguadores monotubo, al penetrar el vástago en el interior del cuerpo del amortiguador ocupa un espacio en el interior de la cámara de aceite que se compensa con una cámara de volumen variable, normalmente rellena de gas presurizado a presión. Al empujar el vástago, la presión que ejerce el aceite sobre dicho pistón flotante hace que la zona de gas se comprima aumentando la presión a ambos lados. Del mismo modo, el aceite pasa obligatoriamente a través de las válvulas del pistón principal. En este caso, la resistencia de amortiguamiento la dan la resistencia que oponen dichas válvulas al paso de aceite.

2.3.3 OTROS ELEMENTOS DE LA SUSPENSIÓN

2.3.3.1 BARRAS ESTABILIZADORAS

Las barras estabilizadoras son utilizadas para contener la fuerza centrífuga que inclina el vehículo hacia fuera cuando este toma una curva, comprimiendo de este modo las ruedas exteriores. Para evitar esto se montan barras estabilizadoras sobre el eje trasero, el delantero, o en ambos. En la figura 2.12 se puede ver la imagen de un vehículo al tomar una curva y su inclinación a consecuencia de esta [1].

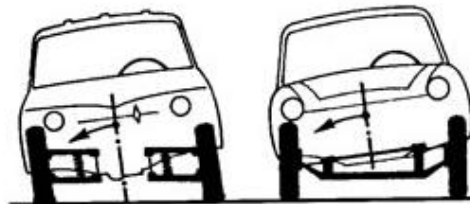


Figura 2.12. Inclinación del vehículo al tomar una curva

Se trata de una barra de acero elástico apoyada en sus extremos a manguitos tubulares de los dos largueros del bastidor; en sus extremos se fijan rígidamente dos bielas que van a articularse sobre los ejes de las ruedas. Si la fuerza centrífuga en una curva tiende, por ejemplo, a subir la carrocería por el lado izquierdo y como consecuencia a bajarlo por el derecho la barra resulta retorcida por las bielas, girando una en sentido contrario de la otra y generando esto un par torsor que contiene la inclinación causante, estabilizando de este modo la carrocería.

Las bielas pueden ser suprimidas dando a la barra forma de U. La barra estabilizadora también actúa al circular en línea recta evitando las oscilaciones laterales o balanceo. En la figura 2.13 se muestra un ejemplo de barra estabilizadora.

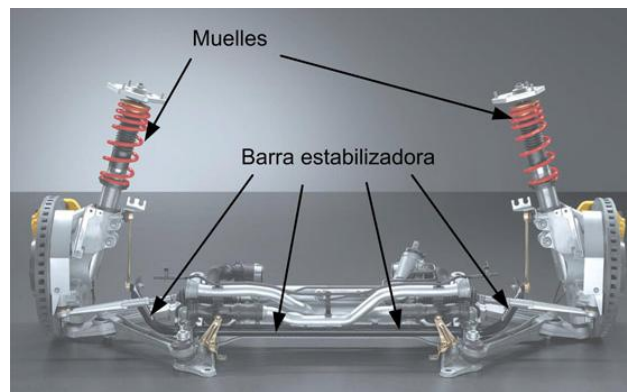


Figura 2.13. Barra estabilizadora

2.3.3.2 CASQUILLOS O *SILENTBLOCKS*

Los casquillos o *silentblocks* se utilizan para unir las suspensiones al chasis amortiguando las reacciones en los apoyos de forma que no existan piezas móviles en contacto. Son elementos de goma vulcanizada utilizados para unir las suspensiones al chasis, de forma que no existan piezas móviles metálicas en contacto. Los casquillos deben conseguir un buen aislamiento y permitir que las suspensiones trabajen correctamente. Los casquillos presentan la ventaja de tener un buen mantenimiento y buena amortiguación propia. A su vez presenta algunos inconvenientes como ser muy sensible al aceite, compuestos químicos y a la temperatura. En la figura 2.14 se muestra la imagen de unos casquillos montados en una suspensión.

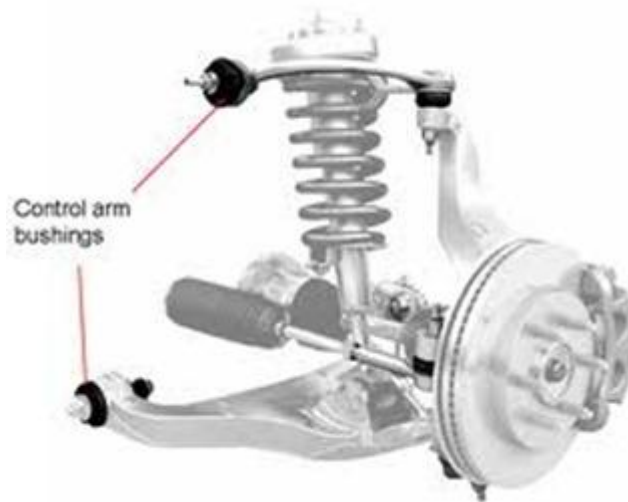


Figura 2.14. Casquillos o Silentblocks montados en una suspensión

2.4 TIPOS DE SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

Actualmente los sistemas de suspensión se pueden clasificar en función de diferentes criterios, pero la mayoría de ellos se basan en el mismo principio de funcionamiento. La elección de una suspensión u otra depende del tipo de comportamiento que se pretende obtener del vehículo. En el presente proyecto se van a clasificar los sistemas de suspensión atendiendo a dos aspectos diferentes. Por un lado, atendiendo a su geometría y por otro lado atendiendo al sistema de control [7].

1. Clasificación atendiendo a su geometría:

- Suspensión independiente
- Suspensión rígida
- Suspensión semirígida

2. Clasificación atendiendo al sistema de control:

- Suspensión pasiva
- Suspensión activa
- Suspensión semiactiva

2.4.1 ATENDIENDO A SU GEOMETRÍA

La clasificación de la suspensión en función de la geometría se divide en tres grandes bloques. Por un lado la suspensión independiente, que engloba a su vez varios tipos (eje oscilante, de brazos tirados o arrastrados, McPherson, paralelogramo

deformable, multibrazo o multilink), por otro lado suspensión rígida, y por último la suspensión semirrígida que engloba a su vez otros tipos (De Dion, eje torsional).

2.4.1.1. SUSPENSIÓN INDEPENDIENTE

En la actualidad la inmensa mayoría de los automóviles utilizan la suspensión independiente para cada rueda en las ruedas delanteras, pero cada vez más se está incorporando en las ruedas traseras. El sistema de suspensión independiente (figura 2.15) tiene un montaje elástico independiente que no está unido una rueda con otra. Una de las ventajas que presenta la suspensión independiente es que se disminuye el peso no suspendido, es decir, el peso cuyos movimientos no es amortiguado por los muelles, se disminuyen los choques transmitidos a los pasajeros debido a las irregularidades del terreno. Por otro lado, las ruedas no se comunican mutuamente las irregularidades del terreno consiguiendo así una marcha más confortable y una dirección más segura [1, 2, 7,10].

Sin embargo, este tipo de suspensión presenta una desventaja, el ángulo de caída de los neumáticos se ve afectado por el balanceo de la carrocería, provocando así un menor agarre de los neumáticos. Es importante corregir este problema utilizando elementos auxiliares como son las barras estabilizadoras.



Figura 2.15. Suspensión independiente

- **Eje oscilante:**

EL sistema de eje oscilante destaca debido a que el eje de rodadura y el semieje son solidarios, de tal manera que el conjunto oscila alrededor de una articulación próxima al plano medio longitudinal del vehículo. Es un tipo de suspensión que no puede ser utilizada como eje directriz debido a que en el movimiento oscilatorio de sus semiejes se nota notablemente la caída de las ruedas en las curvas. Completan el sistema de

suspensión dos conjuntos muelle-amortiguador telescópico. En la figura 2.16 se muestra una imagen de una suspensión de eje oscilante.

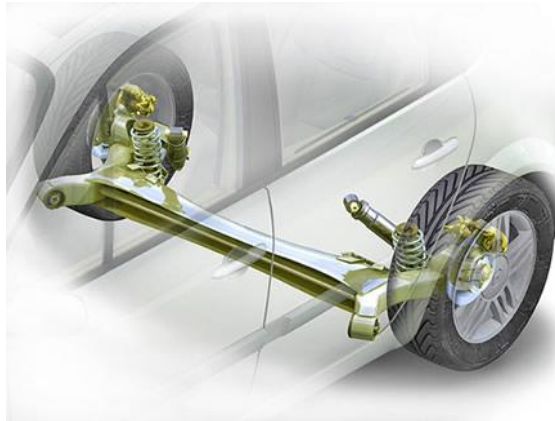


Figura 2.16. Suspensión de eje oscilante

- **Brazos tirados o arrastrados**

Este tipo de suspensión se caracteriza por tener dos elementos soporte o “brazos” en disposición longitudinal que van unidos por un extremo a la mangueta de la rueda y por el otro al bastidor. Si el eje es de tracción el grupo diferencial va anclado al bastidor. En cualquier caso, las ruedas son tiradas o arrastradas por los brazos longitudinales que pivotan en el anclaje de la carrocería.

Este tipo de suspensión presenta variantes, cuyas diferencias están principalmente en cuál es el eje de giro del brazo tirado en el anclaje al bastidor y cuál es el elemento elástico que utiliza.

En la figura 2.17 se observa como los brazos longitudinales pivotan sobre un eje de giro perpendicular al plano longitudinal del vehículo. Este tipo de suspensión apenas produce variaciones de vía, caída o avance de la rueda.

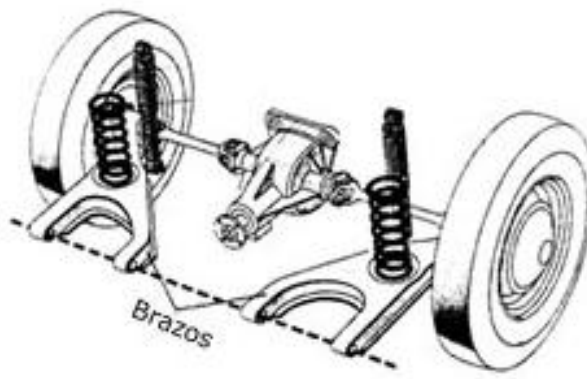


Figura 2.17. Detalle de un sistema de brazos arrastrados

En la figura 2.18 pivotan los brazos sobre ejes que tienen componentes longitudinales, es decir, sobre ejes oblicuos al eje longitudinal del vehículo. A esta variante también se le denomina como "brazos semi-arrastrados" y posee la ventaja de que no necesita estabilizadores longitudinales debido a la propia componente longitudinal que tiene el brazo, por lo que las variaciones de vía y de caída en este caso dependen principalmente de la posición y la inclinación de los brazos longitudinales, dando así mayor estabilidad al vehículo.

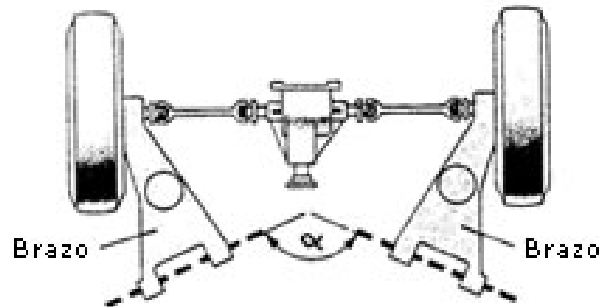


Figura 2.18. Detalle de un sistema de "brazos semi-arrastrados"

Por último, en la figura 2.19 se puede observar la otra variante de este sistema de suspensión conocida como de brazos tirados con barras de torsión. Las barras se montan de forma transversal a la carrocería. Como mínimo se utilizan dos, pudiendo llegar incluso a montar cuatro en vehículos cuyo tarado deba ser mayor.

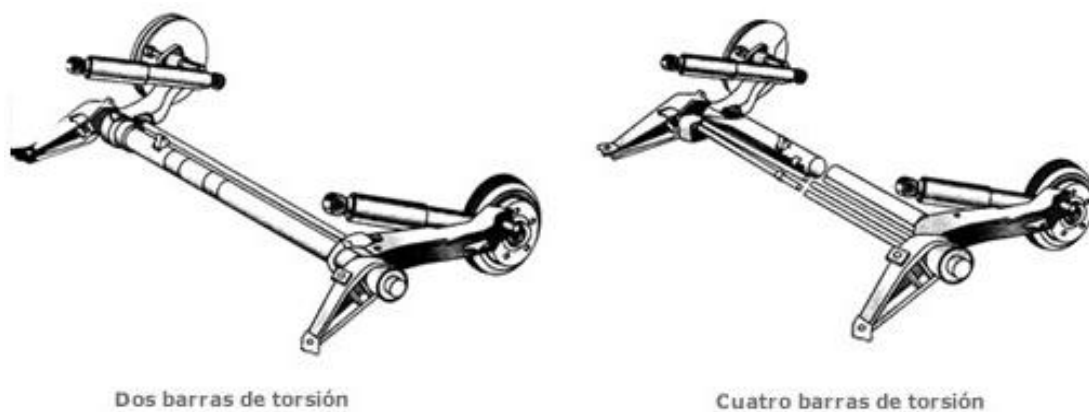


Figura 2.19. Montaje de dos y cuatro barras de torsión

- **McPherson:**

La suspensión McPherson recibe su nombre debido a un ingeniero de Ford, Earle S. McPherson, el cual la desarrolló. Este sistema de suspensión es uno de los más utilizados en los trenes delanteros, pudiéndola encontrar también en los trenes traseros.

Destaca por su sencillez de fabricación y mantenimiento, el coste de producción y el poco espacio que ocupa.

Se caracteriza por tener unido el amortiguador al buje de la rueda, de tal forma que el movimiento del bastidor con relación a la rueda tiene la misma dirección que el eje perpendicular del amortiguador (figura 2.20).

El muelle de la suspensión McPherson es siempre de forma helicoidal, pero no necesariamente concéntrico con el amortiguador, los casos en los que no está concéntrico con el amortiguador son muy raros.

Como elementos de unión entre la rueda y el bastidor, este tipo de suspensión necesita, además del sistema muelle-amortiguador articulaciones en la parte inferior del buje.

Para absorber los esfuerzos transmitidos por la suspensión, es necesario un dimensionado más rígido de la carrocería en la zona de apoyo de la placa debido a que todos los esfuerzos del chasis se transmiten a través del muelle-amortiguador.



Figura 2.20. Suspensión tipo McPherson

- **Paralelogramo deformable**

La suspensión del paralelogramo deformable es junto con la suspensión tipo McPherson una de las más utilizadas tanto para trenes delanteros como trenes traseros. Este tipo de suspensión también es conocida como suspensión de triángulos superpuestos o suspensión por trapecio articulado.

El nombre de “paralelogramo deformable” se debe a los dos elementos superpuestos de la suspensión, que forman un par de lados opuestos del paralelogramo, los otros dos lados son el bastidor y la rueda. La forma del paralelogramo se deforma según se comprime o extiende, de ahí lo de deformable.

El paralelogramo deformable más común tenía como elementos de unión dos triángulos superpuestos, articulándose ambos tanto con el chasis como con la rueda. En la figura 2.21 se muestra un ejemplo del tipo de suspensión paralelogramo deformable.



Figura 2.21. Suspensión del paralelogramo deformable

- **Suspensión Multibrazo o Multilink:**

Las suspensiones multibrazo, al igual que las del paralelo deformable, están formadas por dos brazos transversales, la mangueta de la rueda y el propio bastidor. La diferencia destacable de este tipo de suspensión, es que en lugar de los dos brazos que forman los triángulos, en este sistema, cada brazo es individual, articulado por rótulas para eliminar cargas flectoras.

Los elementos de guía de este tipo de suspensión pueden tener anclajes elásticos mediante manguitos de goma. Debido a esta variante, la suspensión multibrazo permite modificar tanto los parámetros fundamentales de la rueda como la caída o la convergencia, de la manera más apropiada de cara a respetar la estabilidad del propio vehículo en cada situación de uso. Esto significa que puede alcanzarse el máximo confort y estabilidad direccional, y que las dinámicas longitudinal y transversal pueden configurarse de forma precisa y prácticamente independientes entre sí. En la figura 2.22 se muestra una suspensión multibrazo o multilink.



Figura 2.22. Suspensión multibrazo de un eje delantero

2.4.1.2. SUSPENSIÓN RÍGIDA

En los sistemas de suspensión rígida las ruedas del vehículo están unidas mediante un eje rígido, generalmente una barra. Uno de los problemas que presenta este sistema es que las irregularidades del terreno absorbidas por una rueda se transmiten a la otra, afectando así la inclinación de una rueda directamente a la otra. Al ir este eje fijo al bastidor, la inclinación del mismo se transmite a todo el vehículo. En la figura 2.23 se puede apreciar este hecho [7].

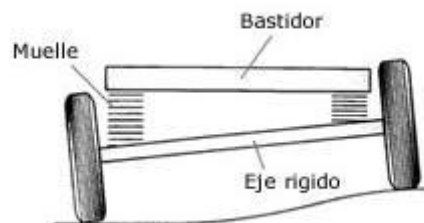


Figura 2.23. Esquema de un sistema de suspensión rígido

Otro de los inconvenientes que presenta este tipo de suspensión es que el peso de las masas no suspendidas aumenta considerablemente debido al peso de la barra, al igual que el peso del grupo cónico diferencial en los vehículos de tracción trasera.

Por otro lado, las ventajas que presentan las suspensiones de eje rígido es que la caída de las ruedas no se ve afectada por el balanceo del coche, por lo que se obtiene un mejor contacto entre la rueda y el pavimento, mejorando así la adherencia y con ello reduciéndose el desgaste de los neumáticos.

Las suspensión de eje rígido han ido sustituyéndose por las suspensiones independientes y la mayoría de ellas se montan en los ejes traseros debido a los

problemas que ocasionaban en la dirección ya que es muy susceptible de sufrir vibraciones. En la figura 2.24 se puede observar una suspensión de eje rígido.



Figura 2.24. Suspensión de eje rígido

2.4.1.3. SUSPENSIÓN SEMIRRÍGIDA

Las suspensiones semirrígiditas están unidas mediante un eje al igual que las suspensiones rígidas, a diferencia de que las irregularidades del terreno, en este caso, solo se transmiten de forma parcial. La suspensión semirrígida tampoco llega a ser independiente debido a la unión del eje. Este tipo de suspensión se puede clasificar a su vez en dos tipos, la suspensión de “eje de Dion” y la suspensión de “eje torsional” [2].

- Suspensión de “eje de Dion”:

Esta suspensión se compone de un tubo lateral telescópico que une las dos ruedas y la combinación de un diferencial y palieres montados en el chasis. La suspensión con eje de Dion es parte de la masa suspendida por lo que va unida al bastidor del vehículo, es una traviesa o tubo que ancla a las ruedas de forma rígida pero permitiendo a la suspensión deslizamientos longitudinales limitados por unos brazos longitudinales que la acompañan. El giro de la rueda se transmite mediante los dos semiejes o “palieres” al igual que en las suspensiones independientes.

Este sistema tiene la ventaja a diferencia del eje rígido de que se disminuye la masa no suspendida debido al eje de Dion.

La suspensión también presenta elementos elásticos de tipo muelle helicoidal. Este tipo de suspensión presenta el inconveniente de su elevado coste. En la figura 2.25 se muestra una suspensión con “eje de Dion”.



Figura 2.25. Suspensión semirrígida con “eje de Dion”

- **Suspensión de “eje torsional”:**

La suspensión de “eje torsional” normalmente es utilizada en vehículos con tracción delantera adaptándose en la suspensión trasera. Ambas ruedas están unidas mediante un tubo con forma de “U” capaz de deformarse un cierto ángulo al atravesar una de las ruedas un obstáculo del pavimento, volviendo después a su posición inicial. Las ruedas están unidas a dos brazos longitudinales unidos por un travesaño que los une y que se tuerce mediante las sacudidas no simétricas estabilizando el vehículo. Esta configuración da lugar, a causa de la torsión del puente, a una recuperación parcial del ángulo de caída de alto efecto de estabilización. Este tipo de suspensión es, actualmente, una de las más empleadas en los vehículos de gama media-baja. En la figura 2.26 se ve una suspensión de “eje torsional”.

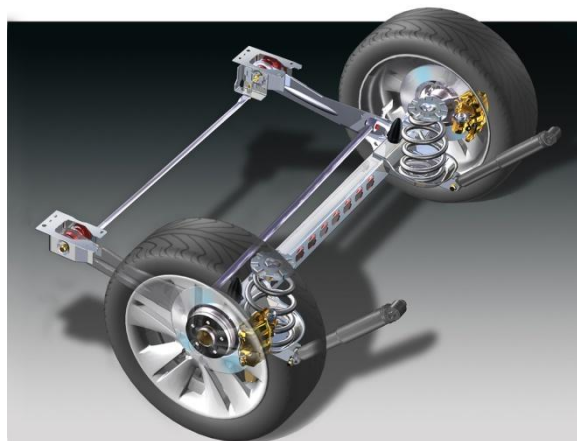


Figura 2.26. Suspensión de “eje torsional”

2.4.2 ATENDIENDO AL SISTEMA DE CONTROL

La clasificación de la suspensión atendiendo al sistema de control engloba tres grandes grupos: Suspensión pasiva, activa y semiactiva. A continuación se explicará detalladamente cada uno de los tres tipos [6, 11,12].

2.4.2.1. SUSPENSIÓN PASIVA

La suspensión pasiva es la más utilizada actualmente en los vehículos, es el que se monta normalmente debido a que es el sistema idóneo para el confort del pasajero. Este tipo de suspensión además de aumentar la seguridad y el confort del pasajero trata de absorber las irregularidades del terreno. Consiste en un sistema de muelle-amortiguador.

Por otro lado, uno de los inconvenientes que presenta este tipo de suspensión es que no ofrece la regulación de la misma, es decir, si este tipo de suspensión es ideal para asegurar el confort de los pasajeros en un determinado terreno, mientras que si la suspensión actúa sobre otro terreno diferente la suspensión no se adapta. En la figura 2.27 se muestra un esquema de suspensión pasiva.

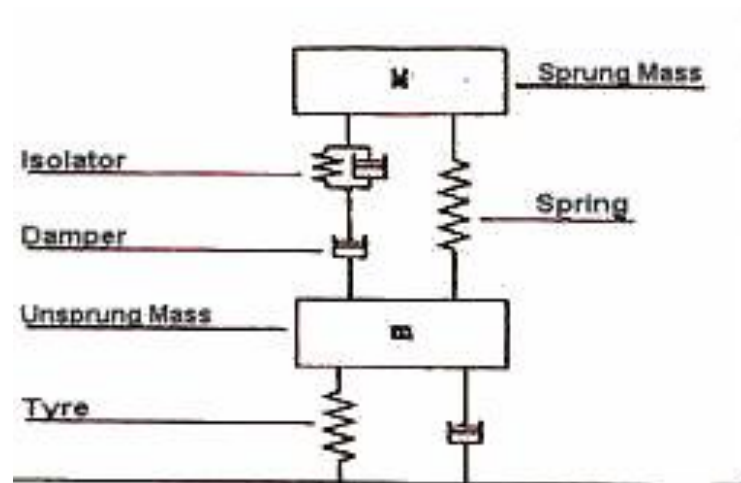


Figura 2.27. Esquema de una suspensión pasiva

2.4.2.2. SUSPENSIÓN ACTIVA

Con el objetivo de conseguir una combinación optima entre un alto nivel de confort y alto nivel de seguridad surgieron las suspensiones activas, las cuales eliminan el cabeceo de frenada y el balanceo en curva manteniendo un constante contacto de los neumáticos con la calzada.

Este tipo de suspensión dispone de un actuador que permite continuamente ajustarse a las condiciones cambiantes de la calzada almacenando, disipando e introduciendo energía en el sistema.

Este tipo de suspensiones consta de un ordenador que indica a un dispositivo colocado en ambas ruedas cómo, cuándo, a qué velocidad y a cuánta distancia debe moverse, lo cual permite que los movimientos de la rueda ya no estén sujetos a interacciones aleatorias entre la carretera y los distintos sistemas que forman la suspensión. Dicho ordenador está compuesto de diferentes sensores que le informan del comportamiento de cada rueda y así poder actuar sobre ellas de la manera más adecuada.

Una de las principales ventajas que se encuentran en la suspensión activa es que se puede conseguir el control de cada rueda independientemente a diferencia de la suspensión pasiva. Esto da lugar a un aumento de la seguridad en la conducción y a una mayor adherencia del vehículo al terreno. El inconveniente que presenta este tipo de suspensiones es su elevado coste.

En la figura 2.28 se observa un esquema simplificado de la suspensión activa.

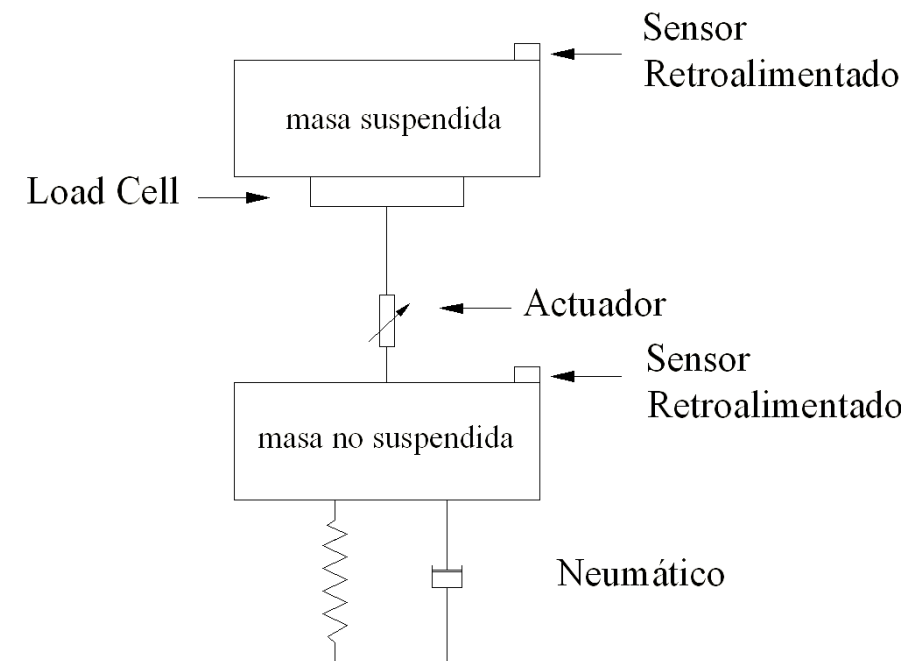


Figura 2.28. Esquema de una suspensión activa

2.4.2.3. SUSPENSIÓN SEMIACTIVA

Las suspensiones semiactivas son las más utilizadas actualmente, ya que son capaces de controlar las bajas frecuencias con elementos activos y las altas frecuencias con elementos pasivos.

Este tipo de suspensión puede modificar el comportamiento de los elementos de la suspensión como amortiguador ó muelle a diferencia de las suspensiones pasivas.

Gracias a la posibilidad de modificar el comportamiento de la suspensión por medio de electroválvulas, las suspensiones semiactivas permiten la posibilidad de ajustar automáticamente la suspensión según las condiciones de la carretera, seleccionar la firmeza de la suspensión, o garantizar un mayor rendimiento en la conducción y un mayor confort.

En la figura 2.29 se puede observar un esquema simplificado del funcionamiento de una suspensión semiactiva.

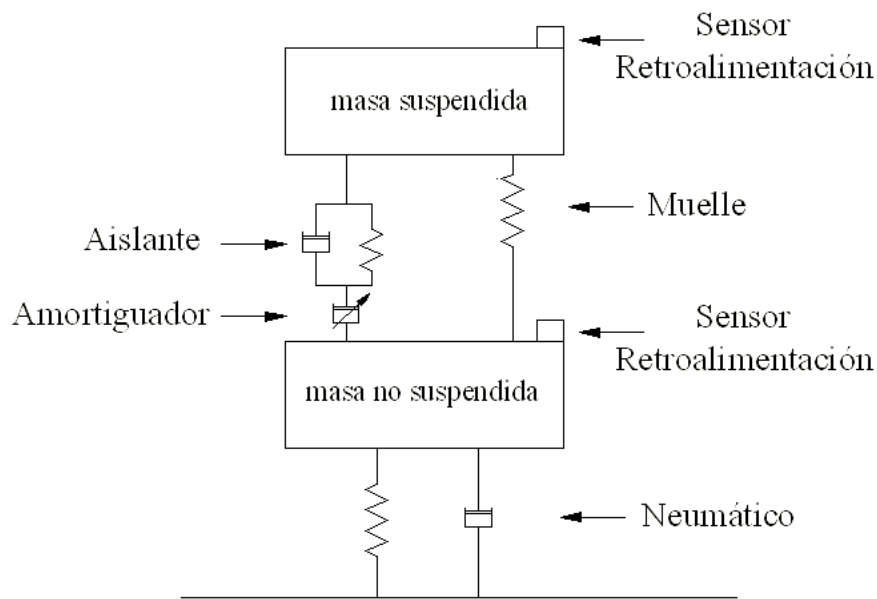


Figura 2.29. Esquema de una suspensión semiactiva

Diferentes marcas de vehículos han desarrollado internamente otros sistemas de suspensión semiactiva los cuales se explican a continuación:

- El sistema *Four-C* (*Continuously Controlled Chasis Concept*) del Volvo S60 R, es un amortiguador regulable electrónicamente. Es capaz de variar muy rápidamente la dureza de cada uno de los amortiguadores. En la figura 2.30 se muestra un ejemplo de este tipo de suspensión.

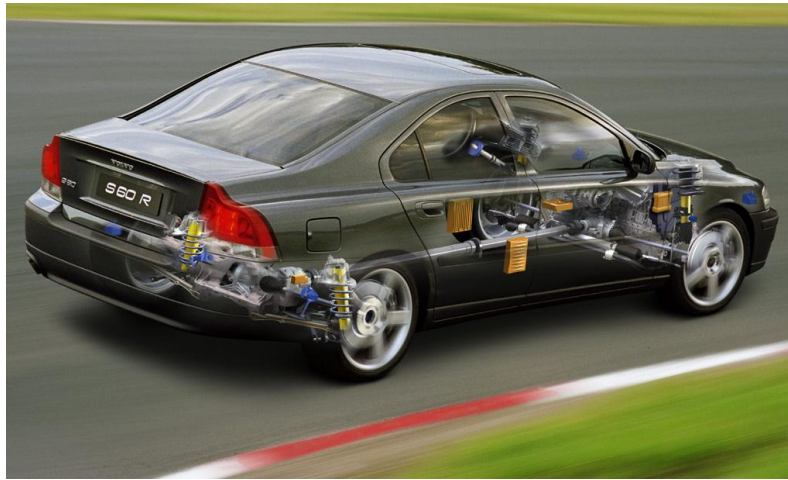


Figura 2.30. Suspensión Four-C del volvo S60 R

- El sistema CATS (*Computer Active Technology Suspension*), este tipo de suspensión consigue un ajuste automático de la dureza de los amortiguadores mediante una regulación electrónica en función de una señal sensorial. Se instala en los modelos más deportivos de Jaguar.
- El sistema *Aimatic Dual Control* de Mercedes Benz, el cual actúa sobre la rigidez del muelle y del amortiguador. Durante la conducción normal el muelle funciona con su volumen de aire máximo, lo que hace que el amortiguador se comporte de una manera blanda. Por otro lado, cuando el vehículo circula sobre irregularidades en el terreno el muelle prescinde de aire y hace que se endurezca.

CAPÍTULO 3

REOLOGÍA

3.1 INTRODUCCIÓN

La reología es la ciencia que estudia la deformación de sustancias bajo el efecto de fuerzas. Esta se limita normalmente a materiales que no obedecen a la Ley de viscosidad de Newton y a la Ley de Hooke. El estudio de esta ciencia es importante actualmente en industrias como la plástica, las de lubricantes, las de pinturas o las de alimentación [10,12].

En cuanto al contexto histórico se empieza a prestar especial importancia a la reología en la segunda mitad del S. XVII, época en la cual se dan a conocer los conceptos de fluidos viscosos ideales y del sólido elástico.

De este modo a finales del S. XVII, alrededor de 1687, Newton definió el fluido newtoniano o líquido viscoso enunciando que la resistencia que se produce como consecuencia de la falta de deslizamiento entre las partes de un líquido es proporcional a la velocidad con que dichas partes se separan las unas de las otras, es decir, la energía suministrada al sistema se disipa en forma de calor, sin recuperar ni siquiera parcialmente su forma original.

Por otro lado, en cuanto al estudio del sólido elástico apareció la Ley de Hooke clave para el estudio de la reología de sustancias sólidas. La Ley de Hooke enuncia que si se aplica una carga sobre un cuerpo sólido, este experimenta una deformación elástica, siempre y cuando no sobrepase el límite elástico.

A partir del establecimiento de estas dos leyes surgen los primeros estudios relacionados con la reología, que se reducen a aplicar la Ley de Hooke para sólidos y la Ley de Newton para líquidos. A partir del siglo XIX se empieza a dudar sobre la certeza de ambas leyes. Así la reología moderna, además del comportamiento elástico y viscoso, estudia también sistemas complejos que presentan simultáneamente propiedades elásticas y viscosas, es decir, sustancias viscoelásticas.

3.1.1 PROPIEDADES REOLÓGICAS

Las propiedades reológicas de los fluidos controlables son dependientes de diversos parámetros como son, la concentración y densidad de las partículas, las propiedades del fluido portador, aditivos adicionales, campo aplicado, la temperatura y otros factores. La independencia de todos estos factores es muy compleja, siendo a su vez importante en el establecimiento de metodologías para optimizar el desempeño de estos fluidos para aplicaciones particulares [10].

Como se ha explicado en el capítulo anterior uno de los elementos más importantes para controlar las vibraciones ocasionadas en el vehículo son los amortiguadores. Los amortiguadores de fluido viscoso se basan en las propiedades constantes de dicho fluido para contrarrestar los efectos de la vibración.

Este tipo de amortiguadores están compuestos por electroválvulas que regulan el paso de caudal y así regular la dureza del amortiguador. Este tipo de amortiguadores tienen la desventaja de que el tiempo de respuesta es muy elevado, siendo del orden de 200 ms.

A causa de la desventaja de estos fluidos, surgen los amortiguadores magneto-reológicos, elementos que utilizan fluidos magnéticos que son capaces de cambiar sus propiedades gracias a un estímulo magnético, lo cual puede ser aprovechable para conseguir una respuesta rápida en el control de vibraciones. Los amortiguadores magneto-reológicos, presentan un tiempo de respuesta del orden de 2 ms.

La figura 3.1 muestra el esfuerzo de corte de cuatro fluidos magneto-reológicos como función de densidad de flujo magnético a una velocidad de corte máxima de 26 s^{-1} . Dicha velocidad de corte es la relación entre la velocidad que experimenta el fluido con la distancia que recorre. El orden ascendente de los registros corresponde a un incremento en la fracción de volumen de hierro. Como se puede apreciar en la figura 3.1, la viscosidad del fluido en ausencia de un campo magnético varía significativamente en función del aceite portador, de los agentes de suspensión y de la carga de partículas.

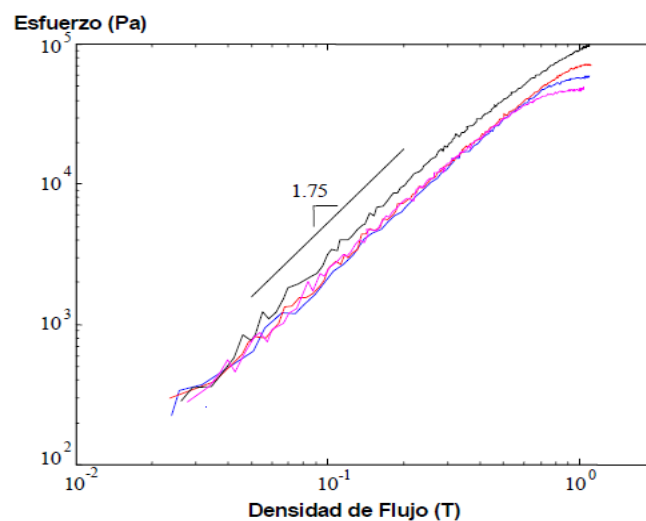


Figura 3.1. Esfuerzo de corte en función de la densidad de flujo

Por otro lado en la figura 3.2 se representa la viscosidad de los fluidos magneto-reológicos como función de la velocidad de corte. La viscosidad del fluido es significativamente una función de la química y composición de los fluidos portadores.

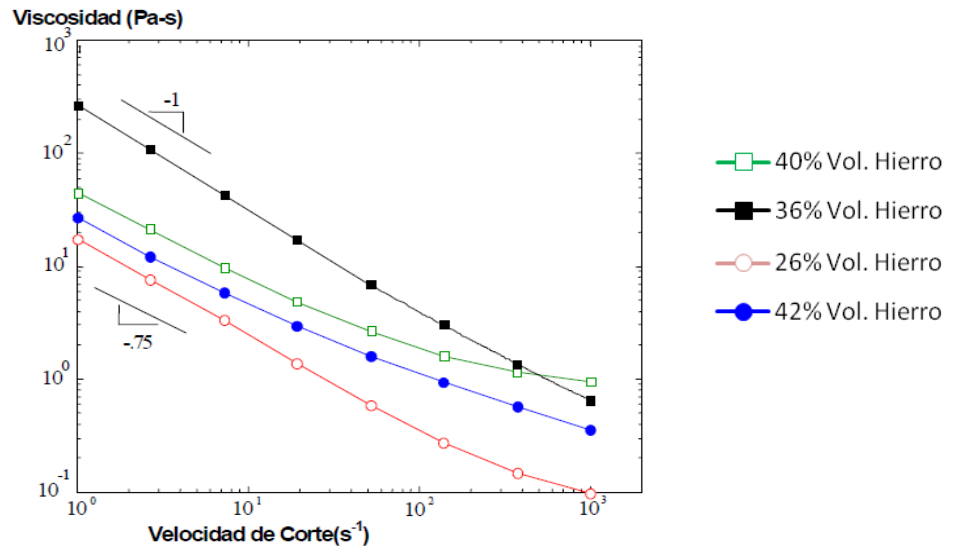


Figura 3.2. Viscosidad como función de la velocidad de corte

3.1.2 APLICACIONES DE LA REOLOGÍA

A continuación, se comentan algunos de los procesos industriales en los que se utilizan los conocimientos reológicos actuales:

- Control de calidad de los alimentos llevado a cabo en la cadena de producción.
- Estudio de la textura y consistencia de los productos alimenticios
- Producción de pegamentos: forma de fluir dentro del recipiente contenido, estudio de su elasticidad, etc.
- Caracterización de elastómeros y polímeros tipo PVC.
- Caracterización de gasolinas y otros tipos de hidrocarburos.
- Estabilidad de suspensiones y emulsiones.
- Producción de medicamentos: se estudia su estabilidad química, su tiempo de caducidad y su facilidad de extrusión, etc.
- Control de sustancias que sean transportadas en el interior de un recipiente cilíndrico.
- Estudio de magma en vulcanología: el volcán tendrá más posibilidad de erupción cuanto más fluido sea el magma.

3.2 LOS MATERIALES INTELIGENTES

El término material inteligente ha ido adquiriendo gran popularidad a lo largo de estos últimos años, por ello, se ha adoptado como un término válido de clarificar y describir una clase de materiales que presentan unas características concretas como son la capacidad de cambiar sus propiedades físicas (rigidez, viscosidad, forma, color, etc.) en presencia de un estímulo concreto[18].

Para poder clasificarlos de acuerdo a este término es necesario que existan unos criterios y que cumplan unos requisitos:

- Estos materiales presentan sensores de reconocimiento y medida de la intensidad del estímulo ante el que reaccionará el material.
- Presentan actuadores que responden ante dicho estímulo.
- Presentan mecanismos de control y selección de la respuesta.
- El tiempo de respuesta es corto.
- El sistema regresa a su estado original tan pronto como el estímulo cesa.

Teniendo en cuenta los criterios citados anteriormente se podría llegar a una definición de sistema inteligente: “Sistema o material que presenta sensores, actuadores y mecanismos de control, intrínsecos o embebidos, por los que es capaz de sentir un estímulo, de responder ante él de una forma predeterminada en un tiempo apropiado y de volver a su estado original tan pronto como el estímulo cesa”.

A continuación, se procede a describir los materiales inteligentes más utilizados en la industria.

3.2.1 MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA

El efecto de memoria de forma puede describirse como la capacidad de un material para cambiar la forma debido a la aplicación de un estímulo externo [13,18].

Bajo el término de materiales con memoria de forma existen cuatro clases diferentes, según la naturaleza, o del material en sí, o del estímulo externo al que responden. La clasificación en que se puede dividir es:

- Aleaciones con Memoria de Forma (*Shape Memory Alloys*, SMAs)
- Polímeros con Memoria de Forma (*Shape Memory Polymers*, SMPs)
- Cerámicos con Memoria de Forma (*Shape Memory Ceramics*, SMCs)

- Aleaciones Ferromagnéticas con Memoria de Forma (*Ferromagnetic Shape Memory Alloys*, FSMAs)

En el caso de la primera clasificación, las aleaciones metálicas, el efecto de memoria de forma se basa en la transición que se produce entre dos fases sólidas, una de baja temperatura o martensítica y otra de alta temperatura o austenítica.

En cuanto a la segunda clasificación, los polímeros con memoria de forma son materiales poliméricos con la capacidad de recordar su forma original. Este efecto está relacionado con la combinación de la estructura y la morfología del polímero junto con el proceso y tecnología de programación de incluso de la forma empleados, es decir, es necesario un entrenamiento del material para que recuerde una forma determinada.

Por otro lado, los materiales cerámicos con memoria de forma, atienden a la definición general de materiales inorgánicos que se producen habitualmente empleando arcillas y otros minerales naturales o procesados químicamente.

Por último, las aleaciones ferromagnéticas con memoria de forma constituyen una nueva clase de materiales que sufren el efecto de memoria de forma bajo la aplicación de diferentes campos magnéticos y que presentan grandes elongaciones. En este caso el comportamiento es similar al de aleaciones con memoria de forma pero con la diferencia de que el estímulo al que responden es, en vez de la temperatura, un campo magnético aplicado.

En la figura 3.3 se puede apreciar el cambio en la estructura cristalina que se produce durante el cambio de fase en las aleaciones con memoria de forma.

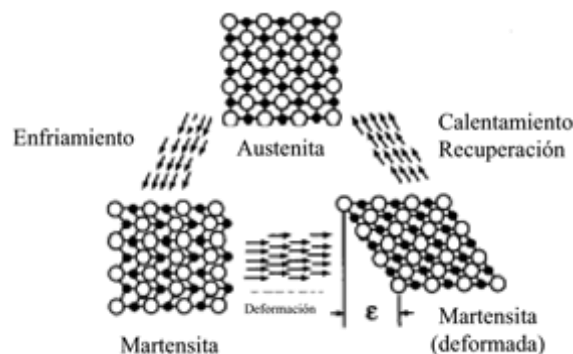


Figura 3.3. Cambio de estructura cristalina en aleaciones con memoria de forma.

3.2.2 MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS Y ELECTROESTRICTIVOS

Los materiales piezoeléctricos son aquellos capaces de adquirir un campo eléctrico cuando se les somete a un esfuerzo mecánico. Este efecto aparece cuando el esfuerzo producido monotónicamente crece con el campo aplicado. Esta propiedad es de gran utilidad cuando se quiere proveer a la interface entre controles eléctricos y sistemas mecánicos de una rápida respuesta. Por otro lado, también se produce el efecto contrario, ya que estos materiales se deforman cuando se les aplica un voltaje [10].

Los materiales electrostrictivos presentan el efecto conocido como electrostricción, el cual implica un cambio de las dimensiones cuando se aplica un campo eléctrico. La diferencia que reside frente a los materiales piezoeléctricos es que en los primeros existe una dependencia cuadrática de la permisividad sobre el campo eléctrico y en los segundos la dependencia que existe es lineal.

Por otra parte, los materiales magnetostrictivos pueden responder a campos magnéticos de la misma manera que los piezoeléctricos lo hacen frente a campos eléctricos.

3.2.3 MATERIALES FOTO Y CROMOACTIVOS

Se denomina materiales fotoactivos a aquellos en los que se producen cambios cuando incide la luz sobre ellos. A su vez, este tipo de materiales también son capaces de emitir luz como consecuencia de algún fenómeno externo. Los materiales que se definen como fotoactivos son:

- *Materiales electroluminiscentes:* son materiales organometálicos que emiten luz de diferentes colores cuando son estimulados por una corriente eléctrica.
- *Materiales fluorescentes:* son materiales semiconductores que emiten luz visible como resultado de activación con la luz UV.
- *Materiales fosforescentes:* son materiales semiconductores que emiten la energía absorbida en luz visible en la oscuridad una vez eliminado la excitación.

En cuanto a los materiales cromoactivos, son aquellos en los que se producen cambios de color como consecuencia de algún fenómeno externo como puede ser la corriente eléctrica, radiación UV o temperatura.

3.3 FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS

En primer lugar es importante realizar la explicación de los fluidos reológicos. Los fluidos reológicos son aquellos cuyas propiedades cambian ante la aplicación de un campo eléctrico o magnético exterior. Los fluidos reológicos son líquidos inertes que portan partículas en suspensión. Estas partículas tienen un tamaño microscópico y son habitualmente aceites de silicona o minerales [10,12].

Dentro de los fluidos reológicos, estos se pueden clasificar en fluidos electro-reológicos y fluidos magneto-reológicos pudiéndose considerar ambos materiales activos. Ambos se basan en el mismo principio pero presentan la diferencia de que reaccionan a estímulos exteriores diferentes. Por un lado, el fluido electro-reológico cambia sus propiedades ante un campo eléctrico exterior, mientras que el fluido magneto-reológico lo hace ante un campo magnético exterior.

Este tipo de fluidos presentan una ventaja destacable, para conseguir una velocidad de deformación determinada es necesario un esfuerzo viscoso superior al que correspondería en el caso de un fluido ordinario, y este esfuerzo se puede controlar en función de la intensidad del campo exterior. Dicho aumento del esfuerzo viscoso no se debe al aumento de la viscosidad, sino que se produce porque el esfuerzo de fluencia aumenta con el valor del campo exterior. Esto se puede apreciar en la figura 3.4.

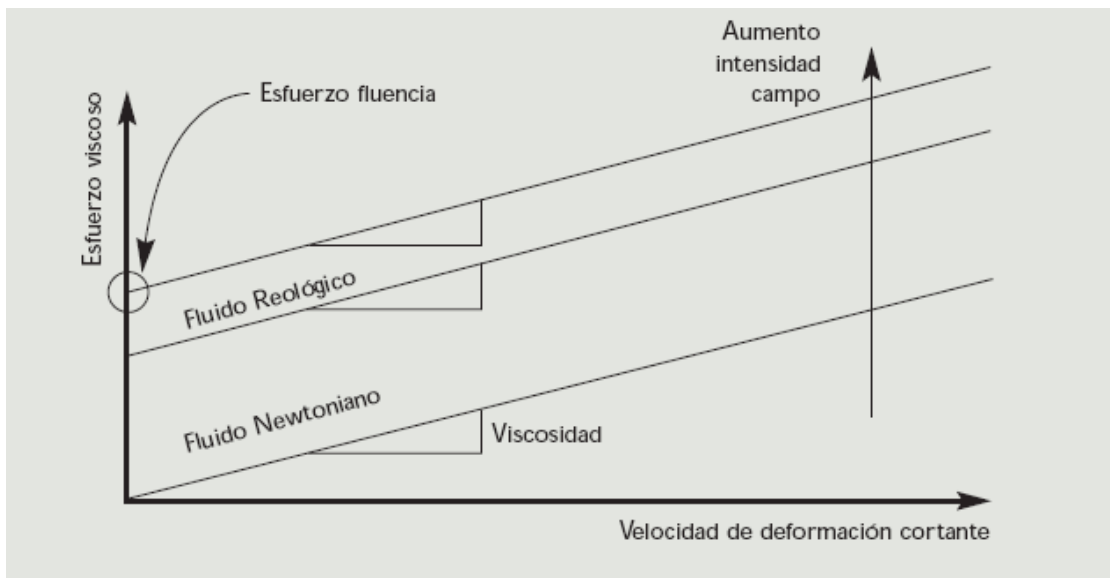


Figura 3.4. Gráfica que relaciona el esfuerzo viscoso con la velocidad de deformación

Debido a esta característica destacada es por lo que este tipo de fluidos se han empleado normalmente como actuadores y especialmente en el control de vibraciones. Por otro lado, el inconveniente que presenta este tipo de fluidos es que necesitan un elevado campo exterior para conseguir que actúen correctamente.

A continuación, se procede a presentar los fluidos que se tratan en el presente proyecto, son aquellos sensibles a la influencia de un campo magnético exterior, es decir, a los fluidos magneto-reológicos.

Los fluidos magneto-reológicos son suspensiones acuosas de microesferas súper-paramagnéticas que contienen gránulos de magnetita dispersos en una matriz polimérica, y sus partículas no tienen remanencia ni histéresis magnética y normalmente se suele añadir un surfactante para estabilizar las suspensiones. Cuando se aplica un campo magnético exterior sobre el fluido se forman cadenas de partículas magnéticas en la dirección del campo aplicado, siempre que la interacción magnética domine sobre la térmica.

Las partículas de los fluidos magneto-reológicos tienen un tamaño microscópico, del orden de 0,5 y 8 μm . Este tamaño de partículas hace que los fluidos presenten grandes ventajas frente a los ferrofluidos, motivo por el cual son empleados en los amortiguadores magneto-reológicos.

Estas estructuras dan lugar a una restricción del movimiento del fluido lo que a su vez produce un incremento de la viscosidad y se desarrolla una resistencia en la suspensión. Cuanto mayor sea el campo magnético aplicado mayor será la energía mecánica necesaria para romper dichas estructuras.

En la figura 3.5 se puede apreciar el efecto de la presencia de un campo magnético sobre el campo de velocidades de un fluido magneto-reológico.

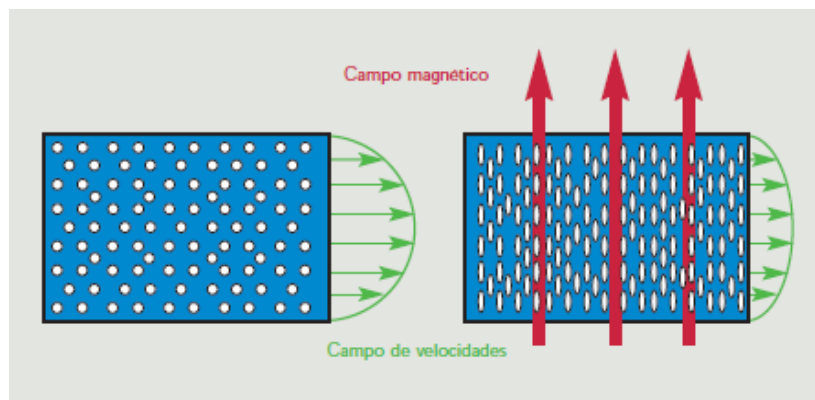


Figura 3.5. Campo de velocidades en un fluido magnético

El diseño de un fluido magneto-reológico requiere la selección previa del aceite base, la naturaleza del material en suspensión, los aditivos necesarios, con el objetivo de conseguir que el fluido presente respuesta suficiente al campo magnético y a su vez que presente estabilidad frente a la agregación y sedimentación de las partículas.

3.3.1 APLICACIONES ACTUALES

Los ejemplos más corrientes en cuanto al uso de fluidos magneto-reológicos se refiere, son: el uso de suspensiones para vehículos, protección sísmica, amortiguadores de vibración, prótesis médicas o el uso en el sistema de frenos del automóvil [12,13,14].

3.3.1.1. SUSPENSIÓN DE ASIENTOS PARA VEHÍCULOS DE TRABAJO PESADO

La figura 3.6 muestra el ejemplo de un amortiguador de fluido magneto-reológico diseñado para utilizarse como sistema de suspensión de asiento semiactivo en vehículos de cargas para travesías largas.

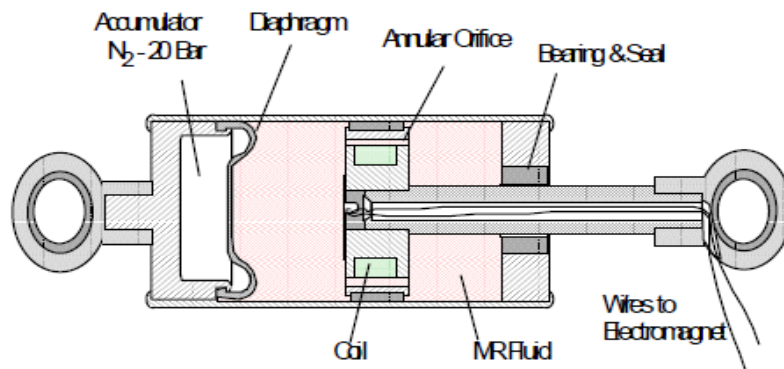


Figura 3.6. Amortiguador de fluido magneto-reológico Rheonetic RD-1001-4

El uso de este tipo de amortiguadores para suspensiones de asiento favorece un control en tiempo real de una posición óptima para ejercer la conducción. Esto es debido a que se consigue adaptar el peso del conductor del vehículo así como los niveles de choque y vibración debidos al terreno por el que se circula.

De este modo, se consigue un ambiente de trabajo más seguro, dado que se mejora la sensibilidad de la conducción, reduciendo la fatiga debido a la misma y a su vez reduciendo el riesgo de accidente.

3.3.1.2. CONTROL DE VIBRACION SÍSMICAS EN ESTRUCTURAS

La prueba del incremento en el crecimiento de la tecnología de dispositivos magneto-reológicos es que se han diseñado y construido amortiguadores de tamaño apropiado para aplicaciones en ingeniería civil.

Para el diseño nominal, fueron elegidos una fuerza máxima de amortiguamiento de 200000 N y un rango dinámico de 10. La figura 3.7 muestra un ejemplo de un amortiguador de fluido magneto-reológico de gran escala.

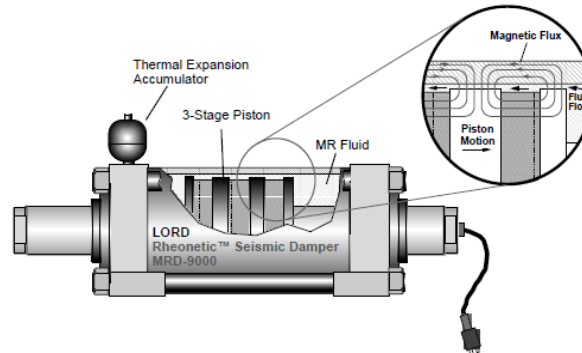


Figura 3.7. Amortiguación sísmico Rheonetic MRD 9000

Una de las aplicaciones más frecuente consiste en la protección sísmica de edificios, esto es posible gracias a unas características muy específicas de este tipo de amortiguadores.

Estos amortiguadores amplían el control sobre los choques sísmicos iniciales como los de las réplicas gracias a su alta fuerza de disipación a velocidad baja, características que fundamentalmente actúan frente al choque de las réplicas. No obstante la reducción del choque inicial, se debe a su rápido tiempo de respuesta, así como a su alto margen dinámico, lo cual permite una optimización continua del sistema.

Este tipo de dispositivos también se utiliza en otras aplicaciones civiles de gran importancia como son los puentes suspendidos por cables, de esta forma, al situar los amortiguadores atados a los cables proporciona una situación continuamente controlable frente a las tensiones producidas por el viento y la lluvia.

3.3.1.3 AMORTIGUADORES DE VIBRACION

En el control de vibraciones es importante la utilización de dispositivos de amortiguamiento y los amortiguadores de fluido viscoso son elementos que aprovechan las propiedades del fluido para proveer una fuerza que contrarreste los efectos de la vibración. En la figura 3.8 se puede observar un amortiguador magneto-reológico utilizado para el control activo de vibraciones en aplicaciones industriales.

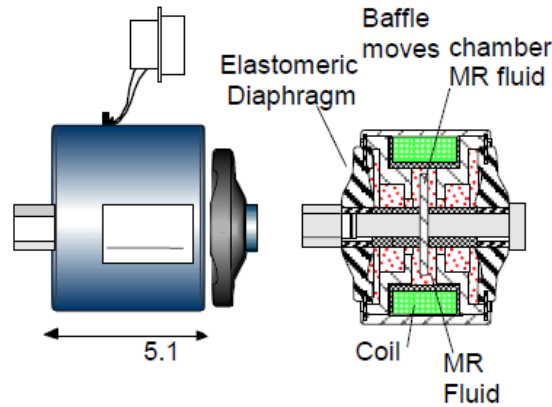


Figura 3.8. Amortiguador de vibraciones Rheonetic RD-1013-1

Una de las aplicaciones destacables de los amortiguadores de vibraciones es absorber las vibraciones de las lavadoras y con ello el ruido generado de las mismas.

3.3.1.4. PROTESIS MEDICAS

La principal aplicación de este tipo de amortiguación en la industria médica se trata de la mejora en la movilidad en aquella pierna que fue amputada por encima de la rodilla. Fue Biederman Motech, un fabricante alemán de productos protésicos quien desarrolló un sistema que aumenta el equilibrio del paso, la estabilidad y la eficiencia de la energía empleada al caminar.

Este sistema, aparte de disponer de un amortiguador, disponía de un sistema de sensores que transferían la información a un programa informático, que a su vez transmitía la orden necesaria al amortiguador. Dicho sistema se puede apreciar en la figura 3.9.

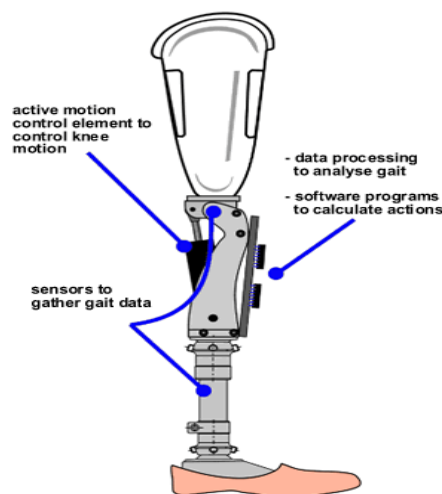


Figura 3.9. Prótesis con amortiguador magneto-reológico

3.3.1.5. FRENO ROTATIVO MAGNETO-REOLOGICO

Los frenos magneto-reológicos de tipo rotativo permiten un control continuo del par de torsión debido a que cuando la corriente de las espiras es cero, no hay campo magnético, y por lo tanto, el par de torsión es mínimo a causa del cierre hermético y la viscosidad del fluido portador. Al crear un campo magnético, se produce como consecuencia un par de torsión donde el valor máximo depende de la máxima corriente que puede soportar el freno.

En la figura 3.10 se puede observar un ejemplo simplificado de los distintos elementos que conforman un freno rotativo magneto-reológico.

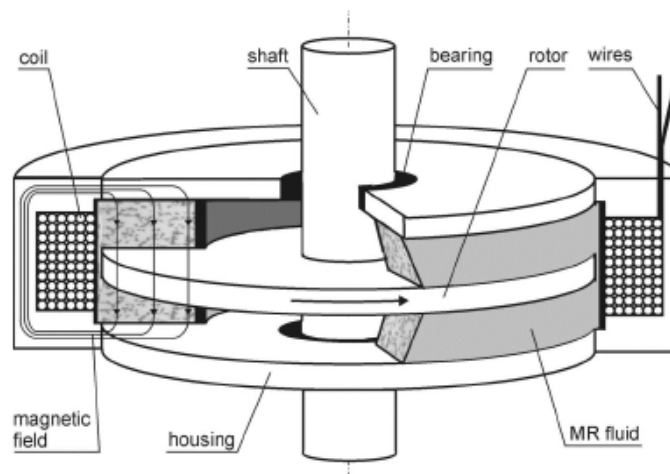


Figura 3.10. Esquema de un freno rotativo magneto-reológico

3.4 AMORTIGUADORES MAGNETO-REOLÓGICOS PARA SUSPENSIONES DE VEHÍCULOS

Los amortiguadores magneto-reológicos para suspensiones de vehículos suponen un avance en cuanto a sistemas de suspensión se refiere desde que el fabricante de componentes de amortiguación, Delphi los desarrollara. Este tipo de suspensión lo dio a conocer en el salón de Fráncfort en 1999 [8, 16,17].

El sistema desarrollado por Delphi consistía en una suspensión semiactiva con amortiguador de fluido magneto-reológico llamado “*Magneti Ride*”. La diferencia destacable respecto a otros sistemas de suspensión reside en el líquido que circula por el interior del vástago el cual contiene aproximadamente un 40% de partículas metálicas en suspensión.

El sistema *Magneti Ride* está compuesto por amortiguadores que contienen fluido magneto-reológico (figura 3.11), bobinas electromagnéticas, además de sensores que detectan tanto el desplazamiento de la suspensión como la aceleración transversal y longitudinal por la unidad de mando.

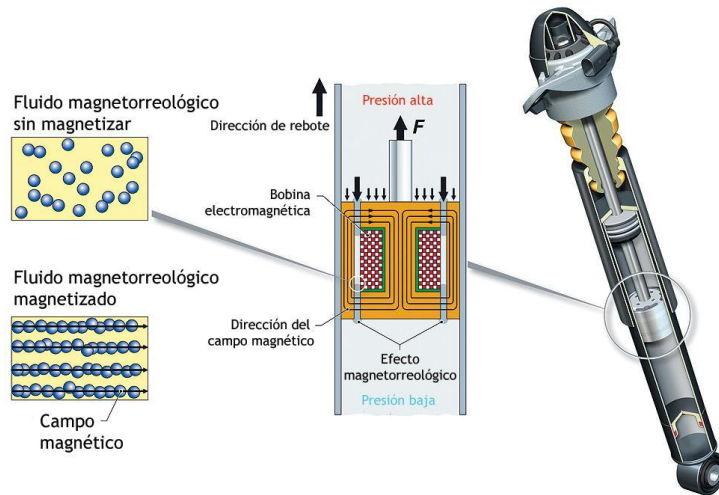


Figura 3.11. Estructura de un amortiguador de Delphi

La resistencia de la suspensión consiste en gran medida de la intensidad con que se aplique campo magnético. A continuación, se procede a explicar el modo de funcionamiento *Magneti Ride*.

Los sensores de desplazamiento mandan señales a la unidad de mando y esta aplica una intensidad de corriente a cada amortiguador dependiendo de la señal que previamente haya recibido de la unidad de mando.

Dicha intensidad de corriente la recibe la bobina electromagnética del amortiguador, variando el campo magnético en relación con la intensidad recibida, y por lo tanto, variando la densidad y consistencia del fluido magneto-reológico.

Los valores de la consistencia de dicho fluido y por lo tanto de la suspensión, dependiendo de la conducción, cambian unas 1000 veces por segundo, lo que hace ajustar inmediatamente la suspensión a las necesidades de la conducción.

No únicamente se adapta a las necesidades de la conducción dependiendo del firme, sino que su sensor de aceleración hace que se adapte a las aceleraciones, frenadas y movimientos oscilatorios de la carrocería.

En el caso de que se produzca una aceleración, la dureza de la suspensión trasera del vehículo aumenta evitando el hundimiento de esta parte y también evita el balanceo producido al pasar por una curva aumentando la dureza de los amortiguadores que van por

el exterior de la curva. Por otro lado, si se produce una frenada brusca aumenta la dureza mediante el campo magnético de la suspensión delantera aumentando así la estabilidad.

En la actualidad este tipo de suspensión la utilizan vehículos de alta gama con altas prestaciones como pueden ser Audi R8 y TT, Chevrolet Corvette, Ferrari 599 GTB y California, Cadillac Seville.

En la figura 3.12 se puede observar la imagen de un Audi R8 equipado con el sistema de suspensión *Magneti Ride* de Delphi.



Figura 3.12. Audi R8 con sistema de suspensión *Magneti Ride*

3.4.1 VENTAJAS E INCOVENIENTES

El comportamiento global del amortiguador puede ser controlado para adaptarse a los requerimientos demandados por cualquier vehículo. Los estudios de los expertos demuestran que este tipo de amortiguación presenta importantes ventajas [13,15]:

- Aumentar el control de los movimientos del chasis para llevar a cabo una conducción suave y sencilla.
- Optimizar el agarre de la calzada para conseguir un mayor control de las ruedas y una sensación de mayor seguridad.
- Controlar las características de la transferencia de carga lateral y longitudinal de la suspensión durante maniobras transitorias.
- Reducir la transmisión de las perturbaciones de alta frecuencia de la calzada a través de los amortiguadores gracias a un mejor aislamiento de la calzada.

Por otro lado cabe destacar algunos inconvenientes que presentan:

- Al ser una tecnología moderna y en desarrollo, su coste es muy elevado.
- También supone un aumento del coste el hecho de la implantación de los dispositivos electrónicos en el vehículo para un correcto funcionamiento del amortiguador magneto-reológico.
- Necesitan un aporte de energía frente a los amortiguadores convencionales.

CAPÍTULO 4

EQUIPAMIENTO UTILIZADO PARA ENTRADAS Y SALIDAS

4.1 HARDWARE

El equipo utilizado en la parte práctica del presente proyecto fue proporcionado por National Instruments. Está compuesto por un chasis en el cual va instalado todo el software necesario y que a su vez se pueden adaptar varios módulos desmontables para la captación de la señal y la alimentación de diversos equipos [19].

El chasis empleado es el NI PXI 1031DC que dispone de cuatro ranuras y que puede ser alimentado de dos maneras distintas, una que va desde los 100 a los 120 V o de 200 a 240 V en corriente alterna (AC) y otra que va desde los 11 a los 30 V en corriente continua (DC). En la figura 4.1 se muestra una imagen del chasis NI PXI 1031DC. Una de las razones por las que se consideró este equipo, el apropiado para la ejecución del presente proyecto, es su fácil manejo debido a su pequeño tamaño y por ello su facilidad para portarlo e instalarlo en el interior del vehículo. Las características técnicas del chasis NI PXI 1031DC se adjuntan en el Anexo A.



Figura 4.1. Chasis NI PXI 1031DC

4.1.1 TARJETAS DAQmx

Para completar el hardware adquirido para la realización del proyecto, se han adquirido dos módulos extraíbles, el NI PXI 6230 y el NI PXI 4472B.

El primero de ellos, el NI PXI 6230 es el encargado de suministrar la alimentación necesaria a los sensores y al amortiguador magneto-reológico (para poder variar la dureza del mismo). Está compuesto por seis entradas digitales, cuatro salidas analógicas de 16 bits de resolución hasta unos 500 KS/s y cuatro canales de salida digital. La alimentación de los sensores y el amortiguador será realizada a través de estas salidas analógicas. En la imagen 4.2 se puede observar la imagen del módulo NI PXI 6230.



Figura 4.2. Módulo NI PXI 6230

El módulo NI PXI 4472B (figura 4.3) está compuesto por ocho entradas analógicas muestreadas simultáneamente y optimizadas ante vibración hasta 102,4 KS/s. Esta tarjeta presenta la capacidad de sincronizar hasta 5000 canales en un sistema PXI. A su vez, dispone de un acoplamiento de AC/DC configurable por software con una resolución de 24 bits. La función principal de este módulo será captar las señales procedentes de los sensores en el momento de la medición, para así guardarlas y analizarlas posteriormente. Las características técnicas del módulo NI PXI 4472B se adjuntarán en el Anexo A.



Figura 4.3. Módulo NI PXI 4472B

4.2 SOFTWARE

A continuación, se va a hacer una explicación del software desarrollado para una compilación y análisis de los datos obtenidos en el momento del ensayo. El software que se instalará en los equipos para el análisis de la toma de datos es el software LabVIEW proporcionado por National Instruments. Este software es capaz de adquirir, guardar y analizar datos de manera interactiva. Esta aplicación posibilita el aprendizaje a través de prácticas experimentales en múltiples disciplinas (incluyendo entre ellas un amplio abanico de ingenierías), ya que permite a sus usuarios conectarse y medir desde miles de instrumentos sobre diferentes buses mediante el empleo de una única interfaz [19].

Este software supone una plataforma completamente interactiva, pudiendo sus investigadores analizar datos y realizar cambios aunque sus aplicaciones se estén ejecutando en ese mismo instante. Además, permite aplicar diversos análisis al sistema de manera más rápida y efectiva, mientras se hacen ajustes de los datos que provienen de los sensores en tiempo real.

LabVIEW permite la posibilidad de crear multitud de informes interactivos, incluyendo además de textos y tablas, gráficas dinámicas que muestran los datos adquiridos y analizados. A su vez, permite la exportación de los datos a paquetes de análisis que faciliten el tratamiento y estudio de los mismos.

4.2.1 ADQUISICIÓN Y ALMACENAMIENTO DE LA SEÑAL EN LABVIEW

Para facilitar la programación mediante *Labview* se dispone del asistente DAQ, el cual puede encontrarse en la paleta de funciones del diagrama de bloques (véase figura 4.4)

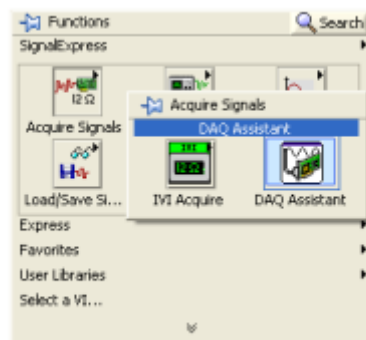


Figura 4.4. Asistente DAQ

Una vez inicializado, este asistente permite seleccionar el tipo de señal, analógica o digital, la tarjeta que se usará así como el canal al que se desea conectar. En la figura 4.5 y 4.6 se puede observar las ventanas de diálogo de estas opciones.

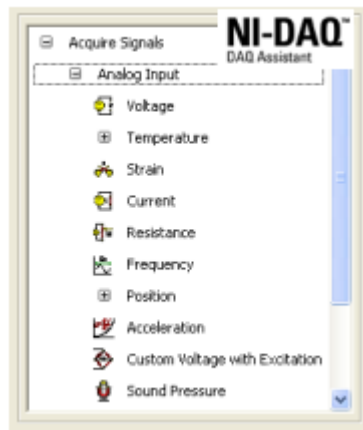


Figura 4.5. Selección tipo de señal

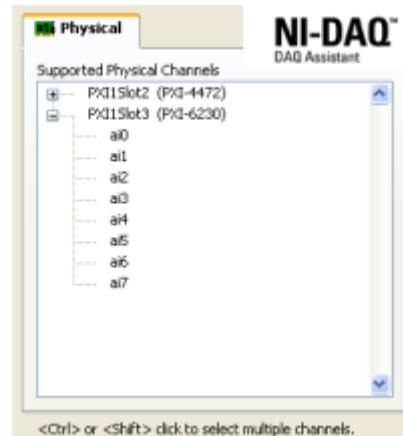


Figura 4.6. Selección de tarjeta y canal

Posteriormente, se selecciona el número de medidas a realizar, la frecuencia de dicha toma de medidas y se procede a realizar la conversión de tensión a desplazamiento ya que por defecto *Labview* proporciona la tensión en función del tiempo y lo que se requiere en la ejecución de este proyecto es el desplazamiento en función del tiempo. La figura 4.7 muestra el cuadro donde se realizan estos ajustes y la figura 4.8 muestra la recta de calibración que permite hacer la conversión de tensión a desplazamiento.

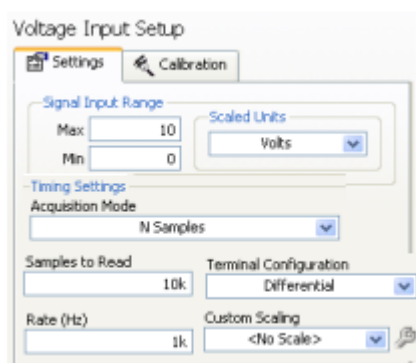


Figura 4.7. Cuadro de ajustes DAQ

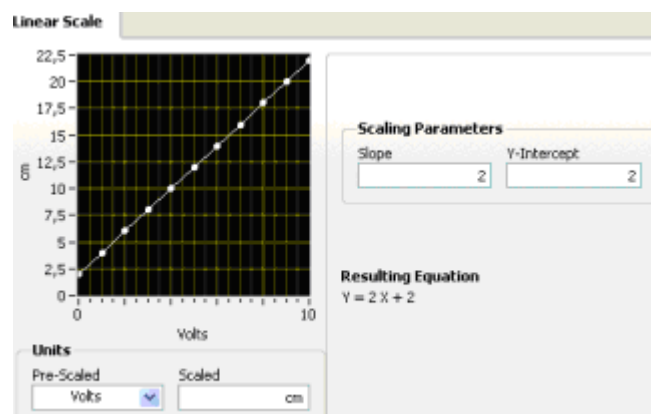


Figura 4.8. Recta de conversión V-cm

De esta manera queda perfectamente definido el *Daq Assistant* que permitirá acoplar diferentes indicadores, tanto numéricos como gráficos, que facilitarán la visualización de la curva trazada en la realización de los ensayos así como los datos tabulados que se podrán convertir fácilmente a formato *Excell*. En la figura 4.9 se muestra la configuración del *Daq Assistant*.

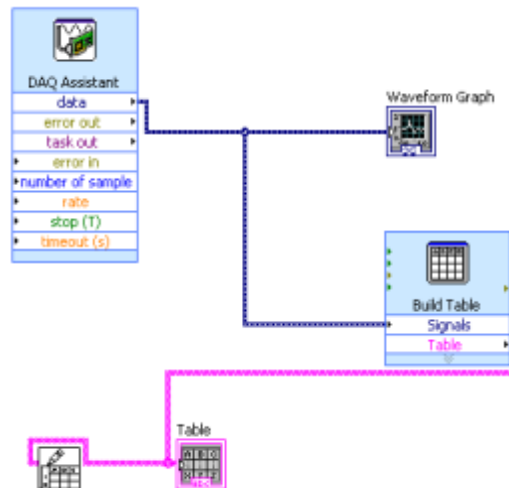


Figura 4.9. Definición gráfica adquisición de datos

Todo este proceso permite la adquisición de señales analógicas, lo cual constituye una de las partes para poder realizar la toma de datos sobre el amortiguador magneto-reológico.

Para la correcta realización de la toma de datos sobre al amortiguador, se requiere la generación de señal en forma de voltaje, lo cual se consigue mediante la programación que se muestra en la figura 4.10.

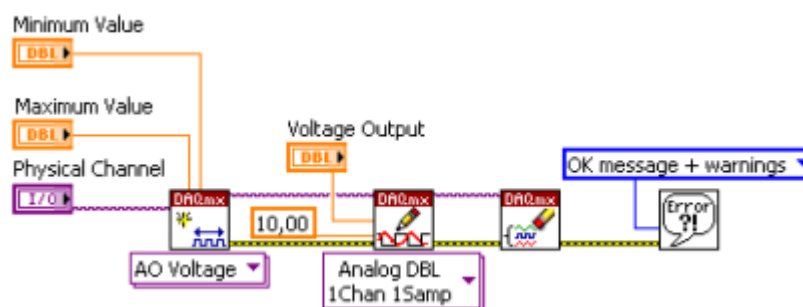


Figura 4.10. Definición gráfica generación de señal

A continuación, en el diagrama se procede a seleccionar el canal de salida así como la tensión de alimentación como se puede observar en la figura 4.11.

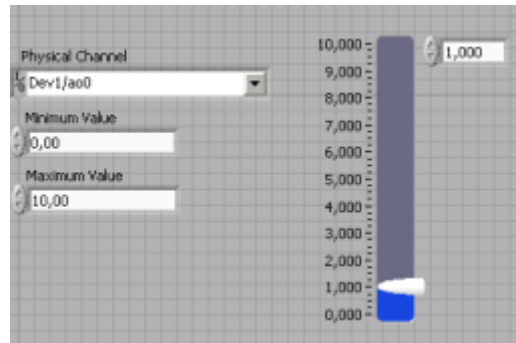


Figura 4.11. Selección canal de generación de señal

Con todo ello se puede comenzar la realización de ensayos realizando todas las conexiones oportunas para cada señal de salida y de entrada. Estas conexiones se presentan en el siguiente capítulo una vez definidos todos los componentes físicos que intervienen en la realización del presente proyecto.

4.3 SENSORES EMPLEADOS

Los sensores extensiométricos instalados en la suspensión delantera del vehículo (figura 4.12), son utilizados para la medición del desplazamiento que experimenta cada amortiguador, por un lado el amortiguador convencional y por otro lado el amortiguador magneto-reológico. Dichos sensores pertenecen al tipo MTN / E de la serie de transductores industriales de desplazamiento LVDT, los cuales presentan rangos de medición que pueden variar desde $\pm 0,5$ hasta ± 500 mm. Este tipo de sensores están dotados de unas extraordinarias características específicas para las condiciones de trabajo más exigentes, incluso en ambiente húmedo o polvoriento. Estas características se presentan gracias a su construcción de acero inoxidable [20].



Figura 4.12. Sensor de desplazamiento LVDT MTN / E

La gama de sensores de DC ofrecen señales de salida que varían de 0 a 10 V con un margen de error de $\pm 2,5V$, así como un cable de salida de 20 mA.

Entre sus características mecánicas destacan la inclusión de núcleo de guiado para la varilla de extensión, la cual incorpora a su vez una rótula para garantizar los grados de libertad posibles. A su vez dispone de otra rótula en el extremo opuesto. En la figura 4.13 se puede observar el plano que describe el sensor.

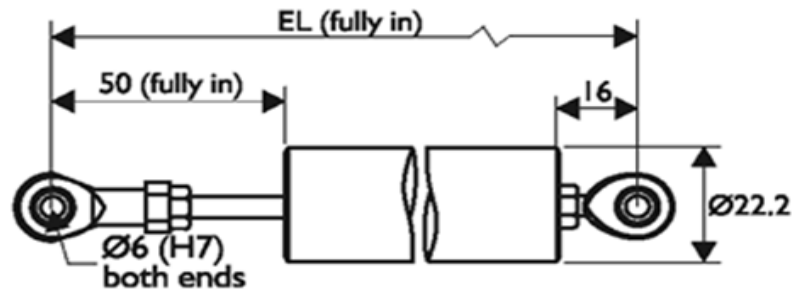


Figura 4.13. Sensor de desplazamiento LVDT MTN / E

La tabla 4.1 recoge los valores de longitud total a sus distintos intervalos de carrera [20].

Tabla 4.1. Relación de longitud con la carrera de desplazamiento LVDT

Versiones Salidas DC	
Carrera (mm)	Longitud(mm)
± 0.5	196
± 2.5	206
± 5	231
± 10	246
± 12.5	276
± 15	291
± 25	351

±50	436
±75	506
±100	566
±125	616
±150	676
±175	731
±200	816
±250	926
±300	1036
±400	1266
±500	1526

4.4 CALIBRACIÓN DE SENSORES

Antes de realizar la instalación de los sensores de desplazamiento fue necesario realizar un estudio completo sobre la linealidad de respuesta que presentan estos sensores. Para ello, se han realizado medidas de su variación de voltaje entre 0 y 10 V. Dichas medidas se realizan a intervalos de 10 mm tanto en carrera de extensión como de compresión, obteniéndose así un total de 10 medidas para cada intervalo.

Para realizar la respectiva calibración de los sensores se ha determinado el comportamiento de ambos, que responde a la ecuación de una recta en la que las ordenadas son el voltaje (en V) y las abscisas al desplazamiento del sensor (en cm). A su vez ha sido necesario determinar los errores que afectan a la pendiente (Δm) y a la ordenada en el origen (Δb). Dichos errores han sido calculados comparando, en primer

lugar, el error de precisión con el error accidental y tomando el mayor de estos para calcular la desviación estándar (σ) en la toma de datos del voltaje. Este valor introducido en las fórmulas (1 y 2), junto con los correspondientes sumatorios para los valores de la posición relativa del sensor, dan los resultados de la pendiente y de la ordenada en el origen, respectivamente:

$$\Delta m = \sqrt{\frac{n\sigma^2}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}} \quad (1) \text{ Pendiente en el origen}$$

$$\Delta b = \sqrt{\frac{\sigma^2 \sum x_i^2}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}} \quad (2) \text{ Ordenada en el origen}$$

La tabla 4.2 contiene a los datos relativos al sensor de desplazamiento colocado en la suspensión delantera derecha. La figura 4.14 muestra la linealidad del sensor, la ecuación de la recta y su coeficiente de correlación.

Tabla 4.2. Relación Voltaje/desplazamiento de datos del sensor delantero derecho

Posición (cm) Tensión (V)	0	2	4	6	8	10	12	14	16,5
1ª Medida	10	9,2	8	7	6	4,8	3,9	2,6	1,5
2ª Medida	10	9,1	8,1	7	5,9	4,8	3,8	2,8	1,6
3ª Medida	10	9,2	8	7	5,9	4,9	3,9	2,7	1,5
4ª Medida	10	9,1	8,1	6,9	5,9	4,8	3,7	2,8	1,6
5ª Medida	10	9,2	8,1	6,9	5,6	4,8	3,7	2,7	1,6
6ª Medida	10	9,1	8	7	5,9	4,8	3,7	2,7	1,5
7ª Medida	10	9,1	8,1	6,9	5,8	4,8	3,8	2,7	1,7
8ª Medida	10	9,1	8	7,1	5,9	4,8	3,7	2,7	1,6

9ª Medida	10	9,1	8	6,9	5,8	4,8	3,7	2,8	1,7
10ª Medida	10	9,2	8,1	7	5,9	4,8	3,9	2,7	1,6
Valor Medio	10	9,14	8,05	6,95	5,86	4,81	3,78	2,72	1,59

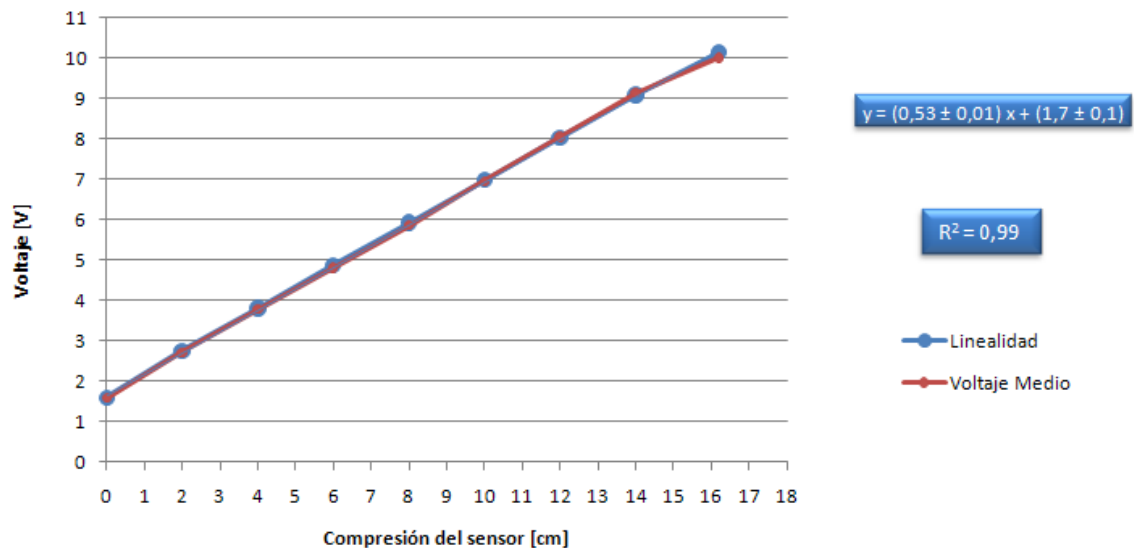


Figura 4.14. Linealidad sensor delantero derecho

Por otro lado, la tabla 4.3 muestra los datos de voltaje relativos al sensor colocado en la rueda delantera izquierda. A su vez, en la figura 4.15, quedan reflejados la linealidad, la ecuación y el coeficiente de correlación.

Tabla 4.3. Relación Voltaje/desplazamiento de datos sensor delantero izquierdo

Posición (cm) / Tensión (V)	0	2	4	6	8	10	12	14	16,5
1ª Medida	10	9,3	8,2	7,2	6,1	5	4	2,9	1,6
2ª Medida	10	9,3	8,3	7,1	6,1	5	3,9	3	1,6
3ª Medida	10	9,2	8,2	7,2	6,2	5,1	4	3	1,6
4ª Medida	10	9,3	8,2	7,2	6,1	5	3,9	3	1,6
5ª Medida	10	9,3	8,2	7,3	6,1	5	3,9	2,9	1,5

6ª Medida	10	9,3	8,1	7,3	6,1	5	4	2,9	1,5
7ª Medida	10	9,3	8,3	7,2	6,1	5,2	4,1	3	1,6
8ª Medida	10	9,4	8,3	7,1	6,1	5	4	2,9	1,6
9ª Medida	10	9,3	8,2	7,2	6,1	5	4	2,9	1,6
10ª Medida	10	9,2	8,2	7,2	6,1	5,2	3,9	3	1,6
Valor Medio	10	9,29	8,2	7,2	6,11	5,05	3,97	2,95	1,58

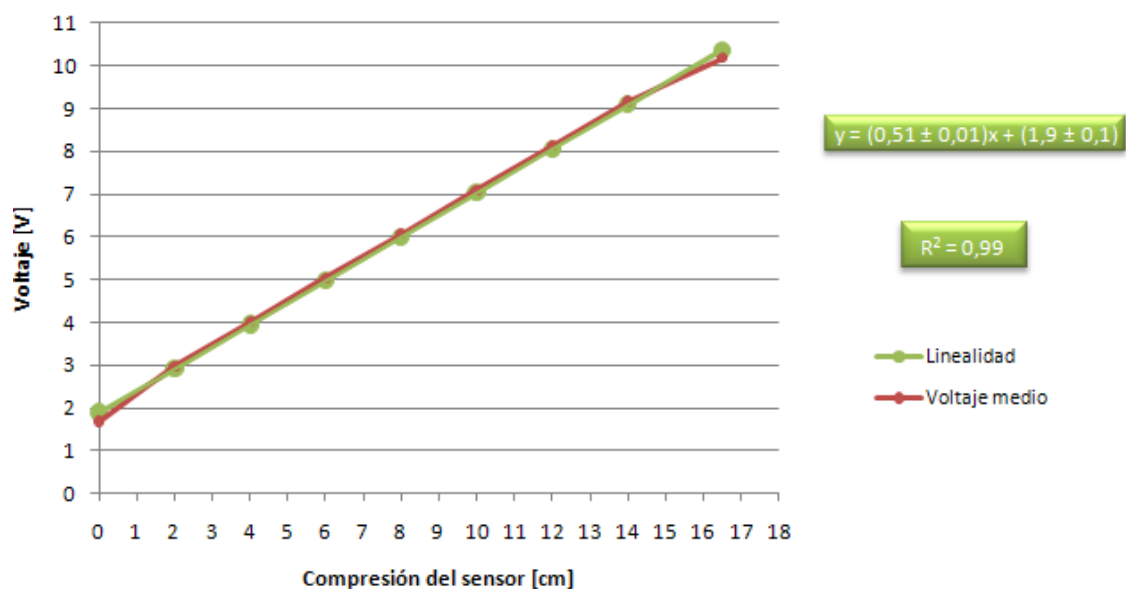


Figura 4.15. Linealidad sensor delantero izquierdo

4.5 KIT CONTROLLER

Se ha utilizado un dispositivo controlador para alimentar al amortiguador magneto-reológico.

El dispositivo controlador utilizado es el *Lord Wonder Box Device controller kit*. Se trata de un producto que sirve de soporte para los dispositivos de fluido magneto-reológico (MR). El dispositivo controlador presenta una capacidad de suministrar 12 V en una corriente continua y 2 salidas a través de los cuales se puede alimentar.

Este dispositivo controlador proporciona un circuito cerrado que controla la corriente para compensar el cambio de cargas eléctricas hasta los límites de la capacidad que puede suministrar. También puede utilizarse como un interfaz para PLC y el control de dispositivos para MR.

En el caso de necesitar realizar un control manual, se proporciona un potenciómetro para controlar la corriente solicitada por un dispositivo ajeno al sistema.

La figura 4.16 muestra el dispositivo controlador que se utiliza, indicando las partes del mismo, las cuales se explican posteriormente.



Figura 4.16. *Lord Wonder Box Device controller kit*

Para realizar operaciones con el dispositivo controlador es necesario conectar cada cable del dispositivo al amortiguador MR. Para ello se introduce el conector dentro del controlador de salida (B). En este proceso la polaridad no es relevante. A continuación, se conecta el suministrador de potencia al conectar la señal de entrada (A). Una vez finalizado este procedimiento el *led* rojo debe permanecer luciendo, lo que indica que el dispositivo controlador está en condiciones para ser utilizado y desempeñar las funciones que se requieran.

En el caso de necesitar un control manual, la corriente que alimenta al dispositivo se debe regular rotando el potenciómetro (C) en el sentido de las agujas del reloj. En esta situación no debe conectarse ningún tipo de control de tensión a la salida del BNC (D).

Para realizar el control del voltaje externo procedente de otra fuente, se debe mantener el potenciómetro a cero, es decir, completamente girado en el sentido de las agujas del reloj.

En este momento se puede conectar una señal de tensión con una valor de 0 a 5 V al terminal BNC del dispositivo controlador, la cual permite controlar la salida de corriente. El control de la señal de entrada puede ajustarse mediante una frecuencia equivalente a 1 KHz. La corriente de salida es proporcional a la señal de entrada de tensión. Esta corriente de salida será igual a cero Amperios cuando el control de la tensión de entrada que se conecta al BNC tenga un valor comprendido entre 0.4 y 0.8 V. Esta última afirmación será objeto de ser comprobado cómo se verá en el capítulo 6 de este proyecto.

Tanto para el control manual como para el control mediando el suministro de tensión externa, la corriente que llega al dispositivo se pueda resetear mediando el botón E disponible en el dispositivo controlador.

Al igual que en los sensores empleados se procedió a la calibración del dispositivo controlador.

La calibración de este dispositivo controlador se realiza para comprobar que la curva proporcionada por el fabricante es adecuada para ser usada, evaluando los valores de voltaje que el fabricante considera críticos a través de sus propios estudios.

Para realizar la calibración del dispositivo se construye un pequeño circuito que permite medir la caída de tensión en el mismo. Una vez conocido este valor, se aplica la Ley de Ohm, ya que es conocida la resistencia del dispositivo controlador. Por tanto, se tiene como única incógnita la intensidad para los diferentes valores de voltaje.

Se toman tres medidas para cada tensión de alimentación con el objeto de obtener valores más fiables y así poder utilizar la recta de calibración proporcionada por el fabricante (véase Anexo A.4)

En la tabla 4.4 se muestran los resultados obtenidos en las tres tomas de datos realizadas para las diferentes tensiones de alimentación. A su vez, en la figura 4.17 se muestra la gráfica y la ecuación correspondiente a estos datos.

Tabla 4.4 Relación voltaje/intensidad en la toma de datos

Voltaje [V]	Intensidad [mA]
0	0
0,25	0
0,5	0
0,75	248,33333
1	524,16667
1,25	821,66667
1,5	1132,5
1,75	1431,6667
2	1730,8333
2,25	2037,5
2,5	2350,8333
2,75	2685,8333
3	3016,6667
3,25	3380,3333
3,5	3748,3333
3,75	4101,6667
4	4486,6667
4,3	4937,5
4,6	5410,8333
5	6144,1667

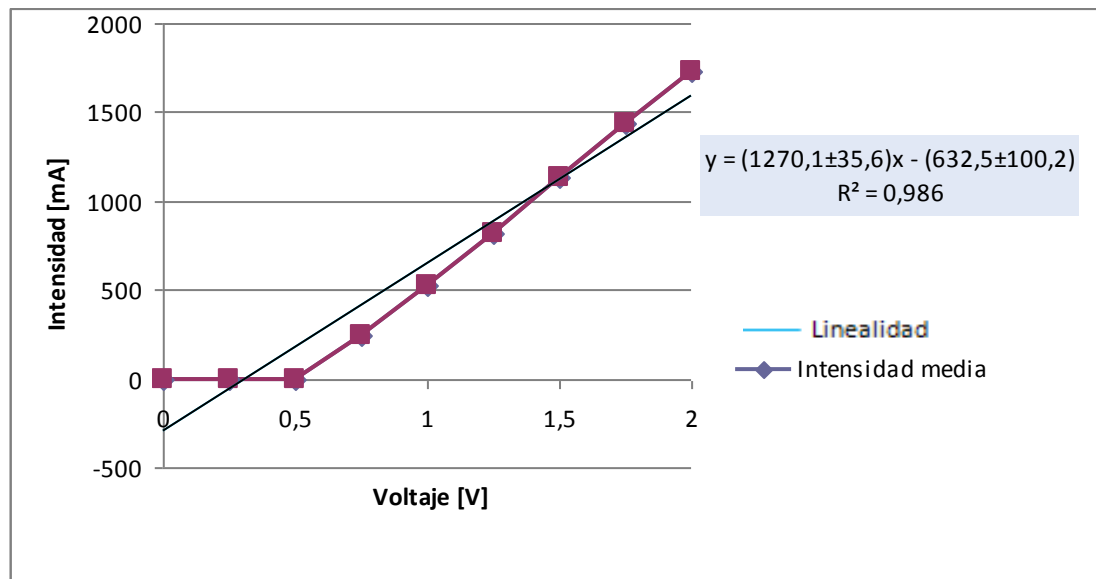


Figura 4.17. Linealidad de la primera toma de datos

Se puede concluir que, para un buen funcionamiento del dispositivo controlador se alimentará con un voltaje que no supere los 2 V, puesto que los datos teóricos experimentales hasta ese valor se ajustan a la recta. Sin embargo, a partir de esta tensión de alimentación, se obtienen valores atípicos en cada una de las tres tomas de datos.

CAPÍTULO 5

ENSAYOS REALIZADOS

5.1 INTRODUCCIÓN

Para la realización de los ensayos y posterior adquisición de resultados del comportamiento del amortiguador magneto-reológico en la suspensión de un vehículo se han utilizado los siguientes equipos:

- Equipo Controlador PXI de National Instruments.
- Sensores de desplazamiento LVDT tipo MTN/E de la serie de transductores industriales.
- Amortiguador magneto-reológico RD 1005-3 de Lord.
- Pantalla de ordenador, pantalla y ratón para analizar y visualizar los datos obtenidos en las mediciones.

Para analizar y estudiar el amortiguador magneto-reológico es preciso realizar varios ensayos en diferentes obstáculos y a su vez con diferentes niveles de voltajes (entre 0 y 5 V) del amortiguador magneto-reológico, es decir, variando su dureza. Los ensayos han sido realizados dentro de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid sobre diferentes terrenos, adoquinado, escalón y badén. El voltaje del amortiguador se ha ido variando entre cuatro niveles diferentes (0, 1, 2,5 y 5 V). Para el ensayo en terreno adoquinado también se ha ido variando la velocidad entre 20, 30 y 40 Km/h.

5.2 CABLEADO Y CONEXIONADO

La alimentación de los equipos empleados es diferente para cada uno de ellos. El equipo controlador PXI's está alimentado por la batería del propio vehículo, ya que requiere una alimentación de entre 11 y 30 V y la batería proporciona un voltaje de 12 V. El teclado y el ratón están conectados al chasis de National Instruments vía USB. Por otro lado, los sensores de desplazamiento van a ir alimentados por el módulo NI PXI 6230, gracias a las 4 salidas de las que dispone, ocupando cada sensor una salida. La tercera salida del NI PXI 6230 será utilizada para proporcionar el voltaje del amortiguador. La cuarta salida no se utilizará ni para alimentar ni para generar. En la figura 5.1 se muestra el *pinout* o esquema de las conexiones realizadas en el módulo NI PXI 6230.

Por último, para poder regular el voltaje de entrada del amortiguador magneto-reológico se lleva a cabo a través de su dispositivo controlador, el cual está alimentado a través del módulo NI PXI 6230 y este a su vez le transmite la alimentación al amortiguador. La pantalla ha sido conectada a la batería del coche, utilizando un transformador de señal de entre 12 y 220 V.

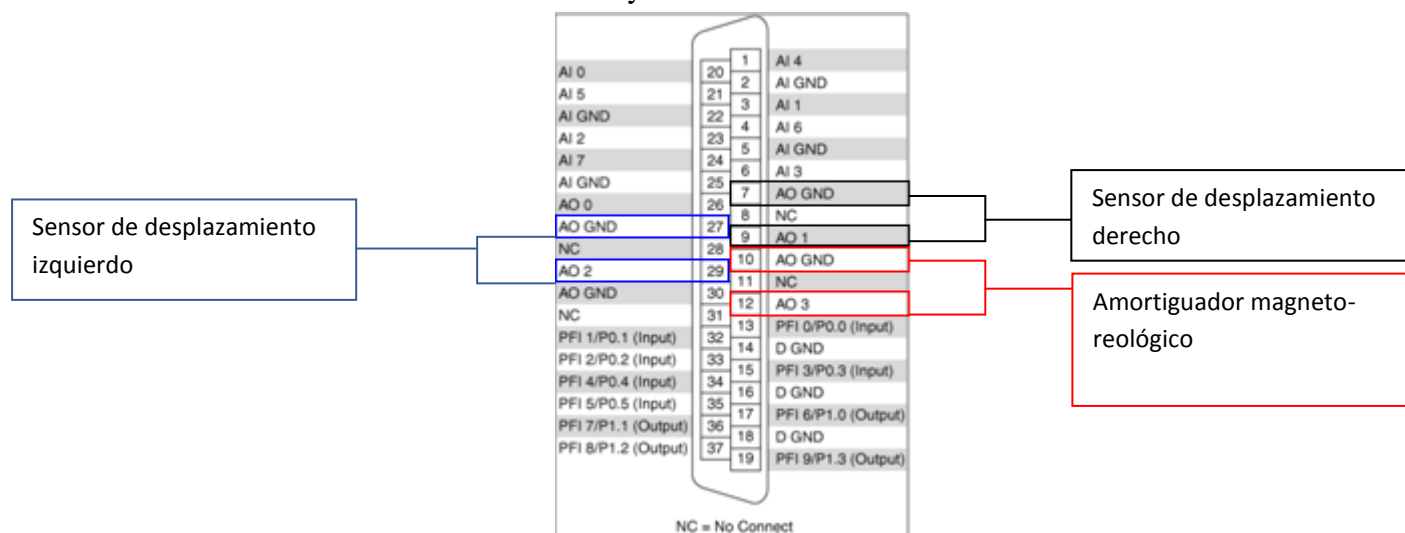


Figura 5.1. Conexiones realizadas en el módulo PXI 6230

El conexionado llevado a cabo entre el amortiguador, los dos sensores de desplazamiento y los módulos PXI 6230 y PXI 4472B, sigue el esquema mostrado en la figura 5.2.

Debido a que los sensores de desplazamiento únicamente cuentan con un cable a 0 V, ha sido necesario realizar un puenteado con clemas para poder llevar la misma tierra a la señal y a la alimentación.

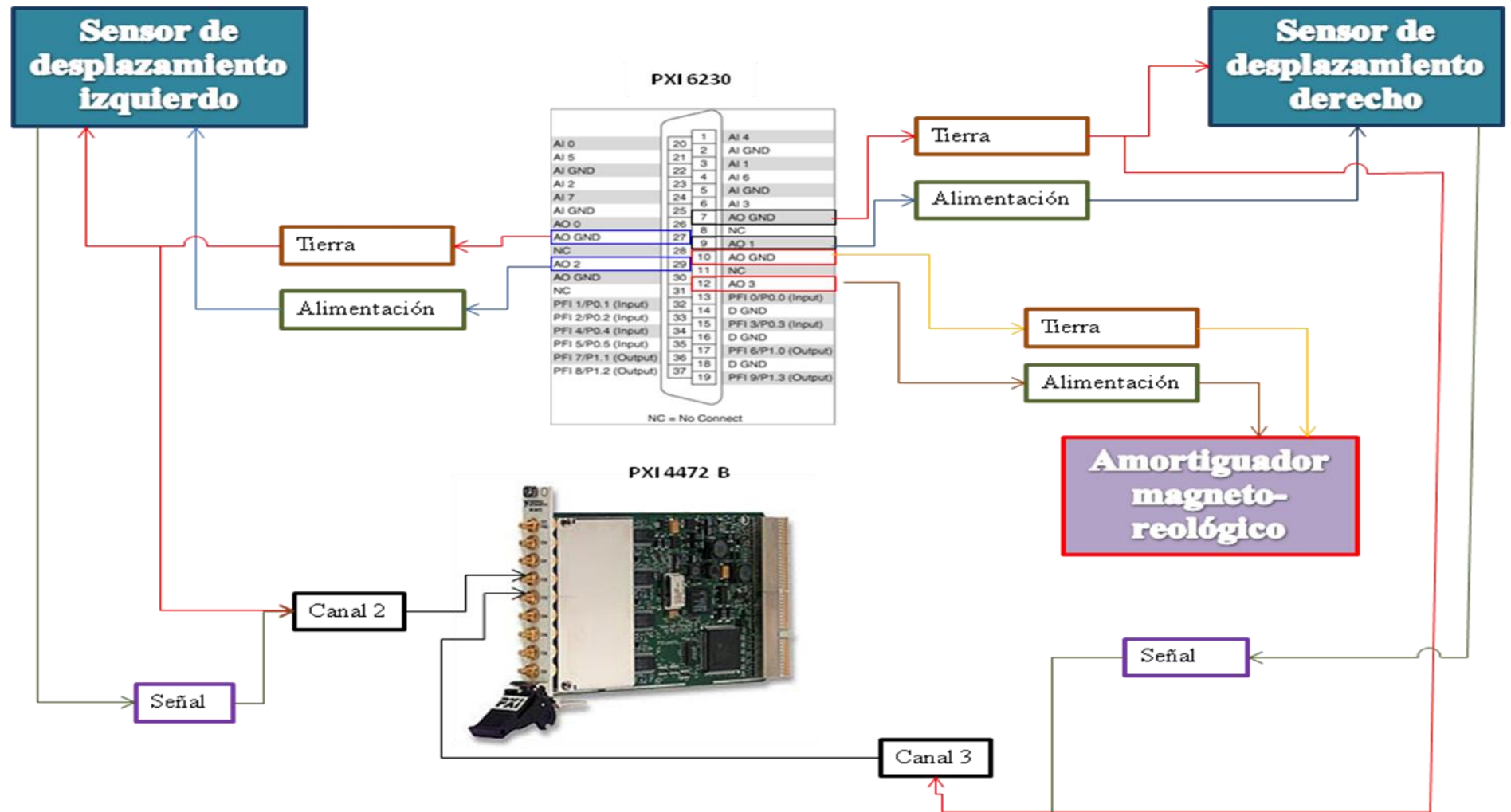


Figura 5.2. Esquema del cableado y conexionado

5.3 COLOCACIÓN DE LOS EQUIPOS EN EL VEHÍCULO

A continuación, se procede a explicar la colocación de los distintos equipos empleados para la adquisición de datos en el vehículo, como son, el equipo controlador PXI, el dispositivo controlador, así como la pantalla destinada a la visualización y posterior tratamiento de los datos adquiridos.

El equipo controlador PXI se ha situado en el asiento del copiloto, ya que era el lugar idóneo para poder realizar todas las conexiones del mismo. En la figura 5.3 se puede observar la posición del equipo PXI en el asiento.

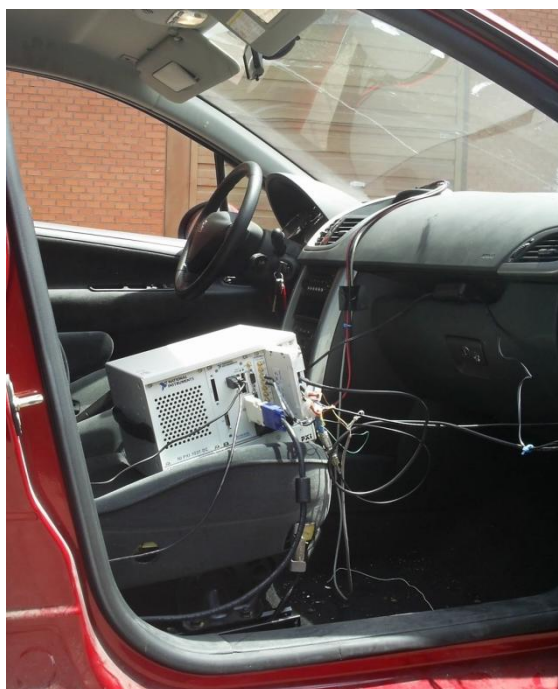


Figura 5.3. Colocación del equipo controlador PXI

Por otro lado, el dispositivo controlador, se ha colocado en el lateral derecho de la luna delantera del vehículo, fijándolo correctamente con adhesivo. Se optó por esta colocación debido a que los cables que unen el amortiguador con el correspondiente regulador eran demasiado cortos. En la figura 5.4 se muestra la colocación del dispositivo controlador.



Figura 5.4. Colocación del regulador de tensión del amortiguador magneto-reológico

Por último, se colocó la pantalla destinada a la adquisición de datos, la cual se colocó en el asiento trasero derecho del vehículo junto con el ratón y el teclado necesarios. Esta colocación se realiza de esta manera para que una persona pueda ir en los asientos traseros del vehículo para controlar la toma de datos. En la figura 5.5 se muestra la colocación de la pantalla en los asientos traseros del vehículo.



Figura 5.5. Colocación de la pantalla, el teclado y el ratón

CAPÍTULO 6

OBTENCIÓN DE RESULTADOS

6.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente proyecto, como se ha mencionado anteriormente, es el estudio del comportamiento dinámico de un vehículo al instalar un amortiguador magneto-reológico en su suspensión, para ello, es necesario realizar diferentes tipos de ensayos para comparar este con el amortiguador de serie que se monta en el vehículo. Los diferentes ensayos tienen lugar dependiendo de diferentes factores como son, el tipo del pavimento, la velocidad del propio vehículo y la tensión que se le aplica al amortiguador magneto-reológico. A continuación se explicará cada uno de los ensayos más detalladamente.

Previamente se obtiene el *Power Spectral Density* (PSD) de la señal procedente de los sensores de desplazamiento para realizar un estudio en frecuencia y así decidir si es necesario un filtro de paso bajo, un filtro de paso alto o, por el contrario, no se requiere ningún tipo de filtro. El estudio en frecuencia, normalmente, se ve afectado por la generación de ruido a altas frecuencias.

El ensayo realizado sobre badén es el más agresivo para el amortiguador. Por este motivo se realiza un ensayo previo sobre badén para filtrar los datos obtenidos y adquirir el PSD correspondiente a los mismos. La figura 6.1 muestra que el estudio en frecuencia realizado no está afectado por la generación de ruido, lo cual se demuestra mediante el empleo de un filtro de paso bajo de tipo *Butterworth* (figura 6.2), cuya frecuencia de corte es 10^2 rad/s, que muestra la superposición de la señal original tomada de los datos medidos por el sensor de desplazamiento y la señal filtrada.

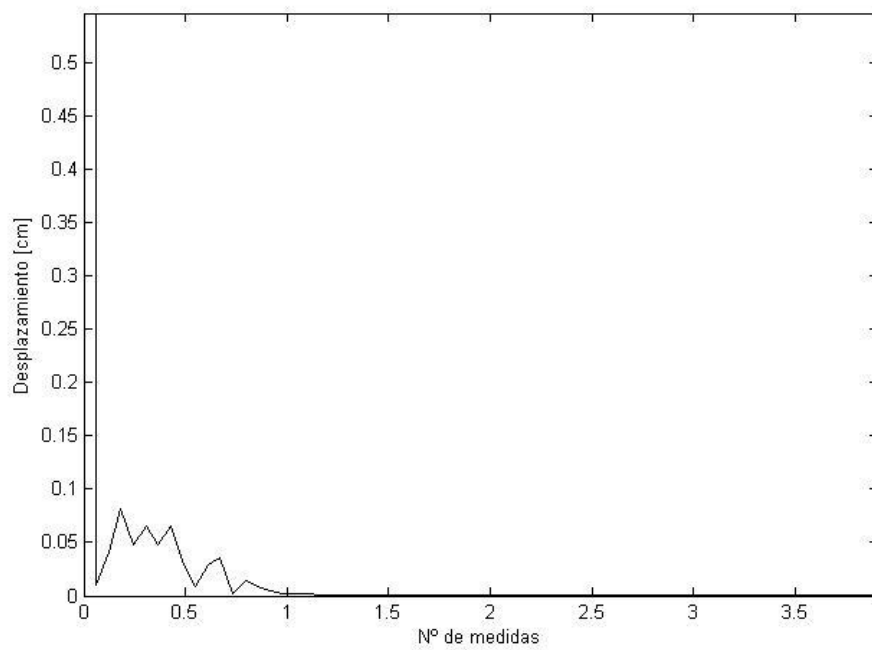


Figura 6.1. PSD de la señal original en el ensayo previo en badén

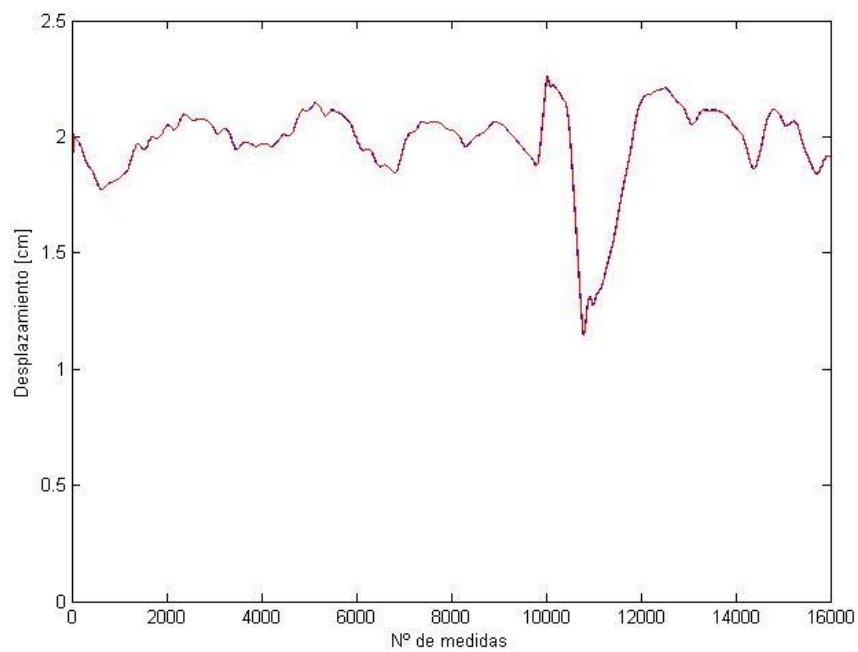


Figura 6.2. Comparación entre señal original y filtrada del ensayo previo en badén mediante filtro *Butterworth*

6.2 TIPOS DE ENSAYOS

6.2.1 ENSAYO SOBRE TERRENO ADOQUINADO

Los ensayos realizados sobre terreno adoquinado se realizan en una distancia aproximada de unos 100 m cambiando la velocidad del vehículo y aplicando diferentes tensiones sobre el amortiguador magneto-reológico. El rango de velocidades utilizado ha sido 20, 30 y 40 Km/h, a su vez, para cada velocidad se varía la tensión con la que se alimenta el amortiguador magneto-reológico entre cuatro voltajes diferentes, 0, 1, 2,5 y 5 V.

En la figura 6.3 se muestra la zona sobre la que se realizan los ensayos.



Figura 6.3. Ensayo sobre terreno adoquinado

6.2.2 ENSAYO SOBRE BADÉN

Los ensayos practicados sobre badén se realizan superando el obstáculo que se muestra en la figura 6.4. Este ensayo es el que resulta más agresivo para el amortiguador magneto-reológico ya que alcanza el máximo de su recorrido al ser un amortiguador diseñado para amortiguar las vibraciones en el asiento de un vehículo de gran tonelaje. Durante el ensayo, la velocidad del vehículo se varía entre 15 y 20 Km/h. Para cada velocidad se varía la tensión con la que se alimenta el amortiguador magneto-reológico entre cuatro voltajes diferentes, 0, 1, 2,5 y 5 V.



Figura 6.4. Ensayo realizado sobre badén

6.2.3 ENSAYO SOBRE ESCALÓN

El ensayo sobre escalón se realiza superando uno de los escalones situado en la zona de realización de los ensayos (figura 6.5). La velocidad con la que se realizan estos ensayos ronda entorno a los 20 Km/h, velocidad mínima que necesita llevar un vehículo para rebasar este tipo de obstáculos. Para cada ensayo se varía la tensión con la que se alimenta el amortiguador magneto-reológico entre cuatro voltajes diferentes, 0, 1, 2,5 y 5 V.



Figura 6.5. Ensayo sobre escalón

6.3 OBTENCIÓN DE RESULTADOS

6.3.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE TERRENO ADOQUINADO A 20 Km/h

En las figuras 6.6 a 6.9 se muestra la lectura de los sensores de desplazamiento obtenida en la suspensión delantera cuando se alimenta al amortiguador magneto-reológico a 0, 1, 2,5 y 5 V, respectivamente.

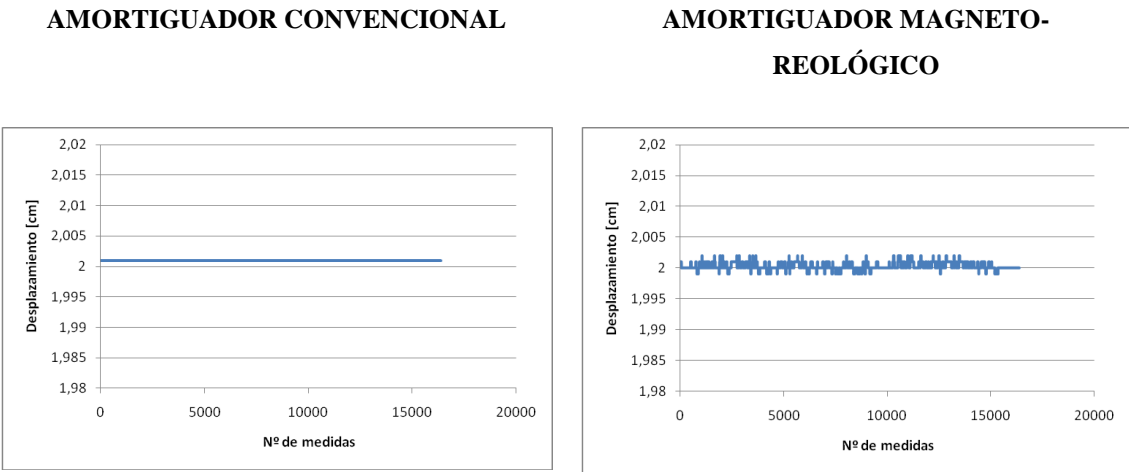


Figura 6.6. Ensayo sobre terreno adoquinado a 20 Km/h y 0 V

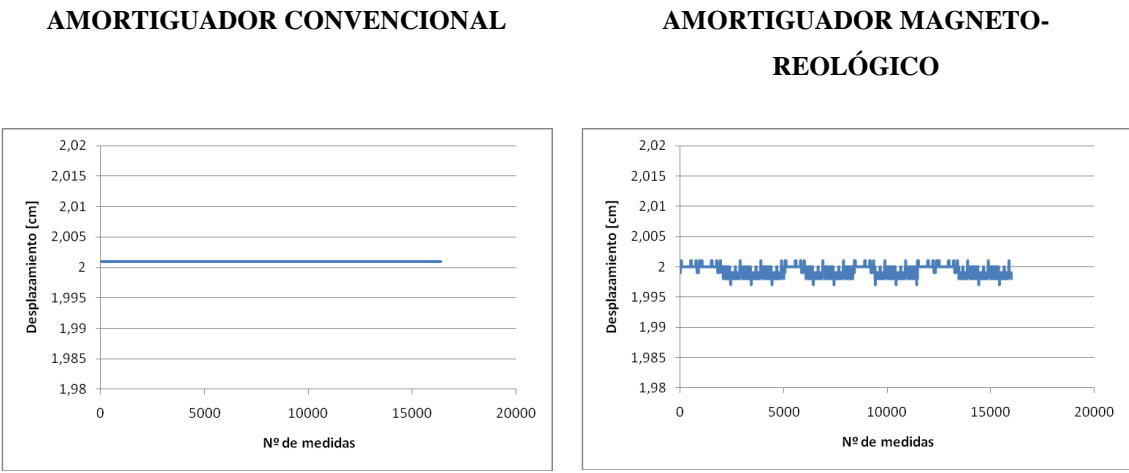


Figura 6.7. Ensayo sobre terreno adoquinado a 20 Km/h y 1 V

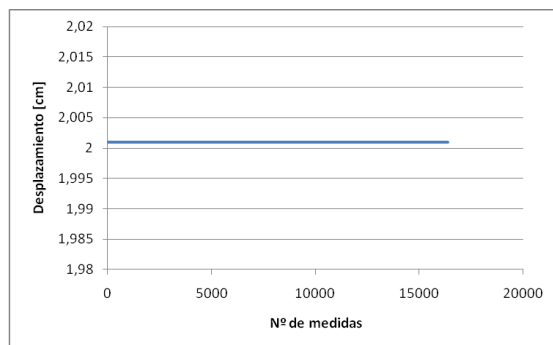
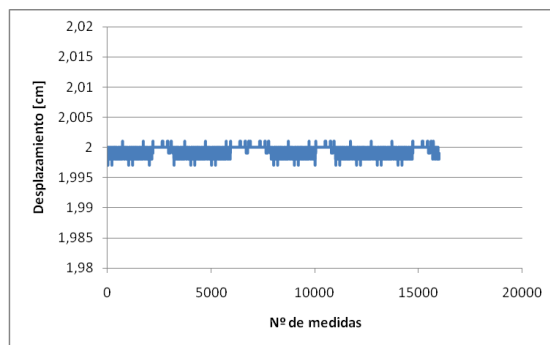
AMORTIGUADOR CONVENCIONAL**AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO**

Figura 6.8. Ensayo sobre terreno adoquinado a 20 Km/h y 2,5 V

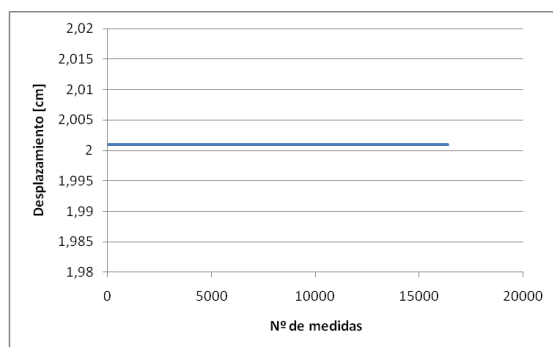
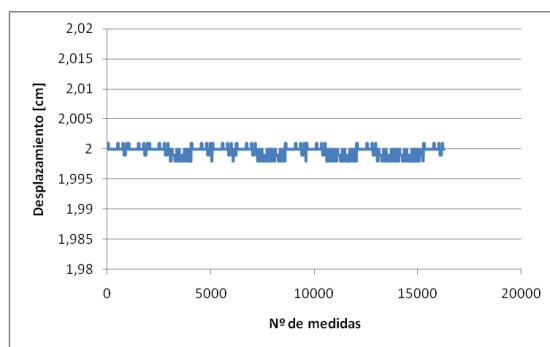
AMORTIGUADOR CONVENCIONAL**AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO**

Figura 6.9. Ensayo sobre terreno adoquinado a 20 Km/h y 5 V

En la tabla 6.1 se muestran los RMS correspondientes al amortiguador magneto-reológico para adoquinado a 20 Km/h en comparación con los del amortiguador convencional.

Tabla 6.1. RMS amortiguador magneto-reológico y convencional para adoquinado a 20 Km/h.

RMS	0 V	1 V	2,5 V	5 V
Derecho	2,00027411	1,99938487	1,99928275	1,99919269
Izquierdo	2,001	2,001	2,001	2,001

6.3.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE TERRENO ADOQUINADO A 30 Km/h

En las figuras 6.10 a 6.13 se muestra la lectura de los sensores de desplazamiento obtenida en la suspensión delantera cuando se alimenta al amortiguador magneto-reológico a 0, 1, 2,5 y 5 V, respectivamente.

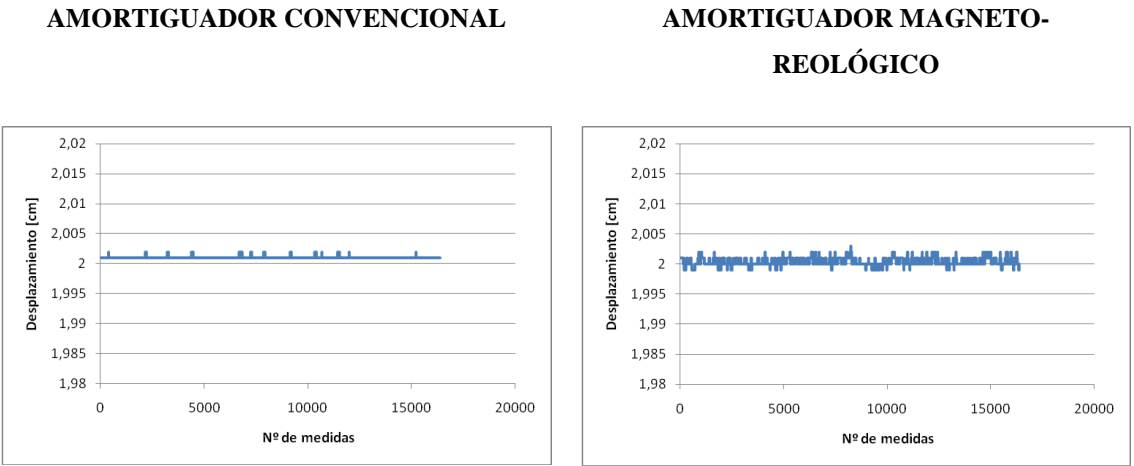


Figura 6.10. Ensayo sobre terreno adoquinado a 30 km/h y 0 V

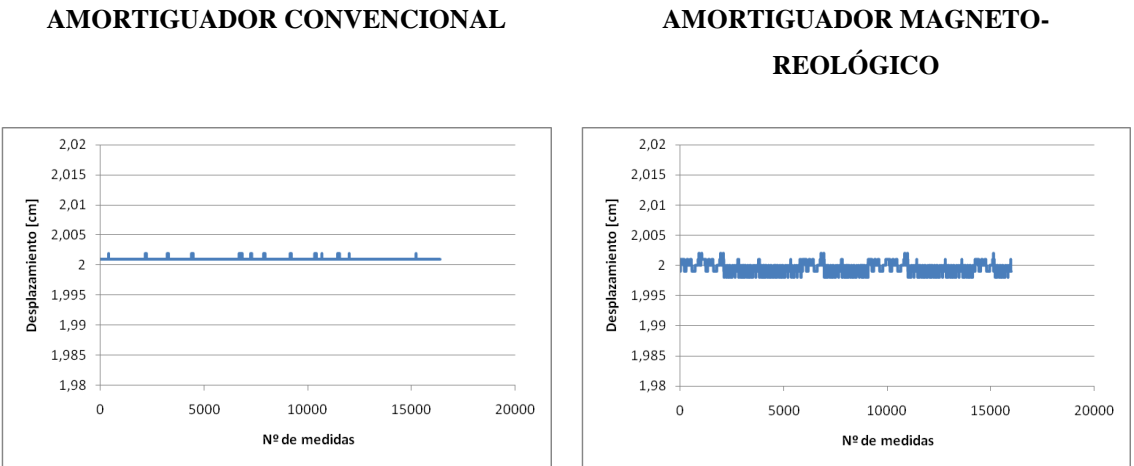


Figura 6.11. Ensayo sobre terreno adoquinado a 30 Km/h y 1 V

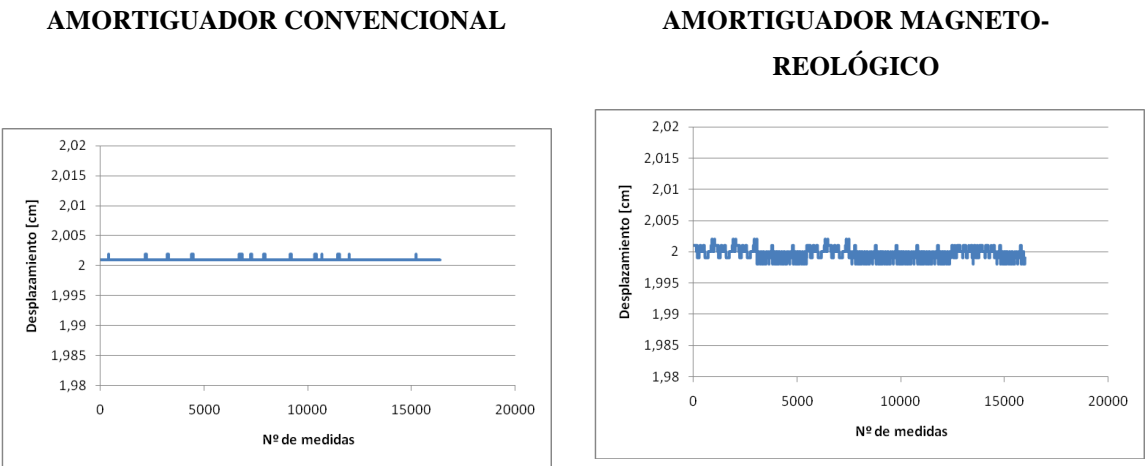


Figura 6.12. Ensayo sobre terreno adoquinado a 30 Km/h y 2,5 V

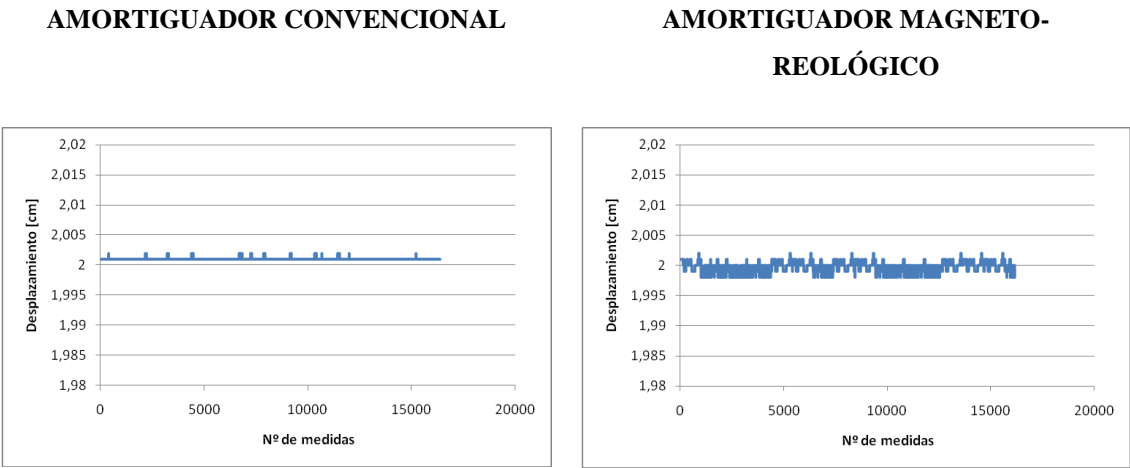


Figura 6.13. Ensayo sobre terreno adoquinado a 30 Km/h y 5 V

En la tabla 6.2 se muestran los RMS correspondientes al amortiguador magneto-reológico para adoquinado a 30 Km/h en comparación con los del amortiguador convencional.

Tabla 6.2. RMS amortiguador magneto y convencional para adoquinado a 30 Km/h

RMS	0 V	1 V	2,5 V	5 V
Derecho	2,00032776	1,99952846	1,999507	1,99949853
Izquierdo	2,001012207	2,001012207	2,001012207	2,001012207

6.3.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE TERRENO ADOQUINADO A 40 Km/h

En las figuras 6.14 a 6.17 se muestra la lectura de los sensores de desplazamiento obtenida en la suspensión delantera cuando se alimenta al amortiguador magneto-reológico a 0, 1, 2,5 y 5 V, respectivamente.

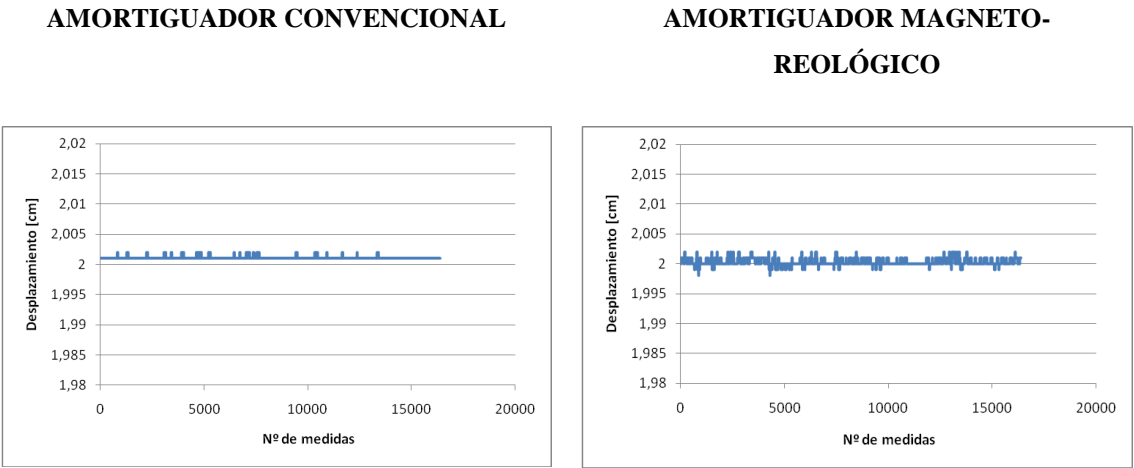


Figura 6.14. Ensayo sobre terreno adoquinado a 40 Km/h y 0 V

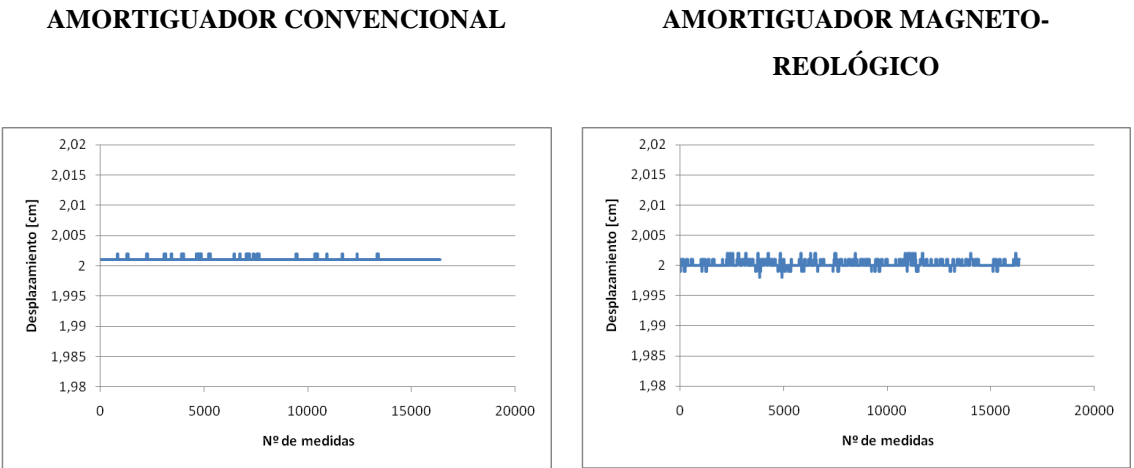


Figura 6.15. Ensayo sobre terreno adoquinado a 40 Km/h y 1 V

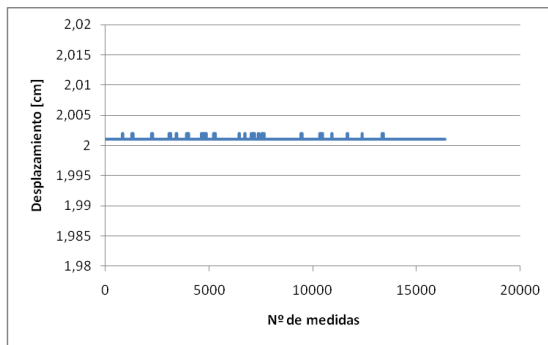
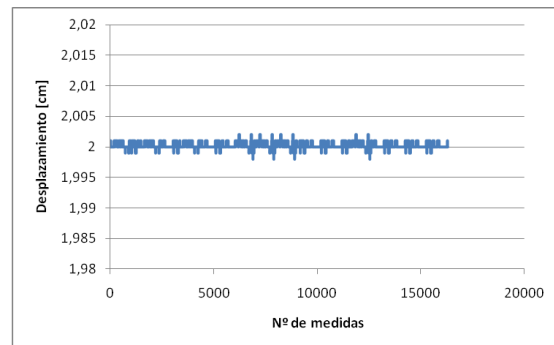
AMORTIGUADOR CONVENCIONAL**AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO**

Figura 6.16. Ensayo sobre terreno adoquinado a 40 Km/h y 2,5 V

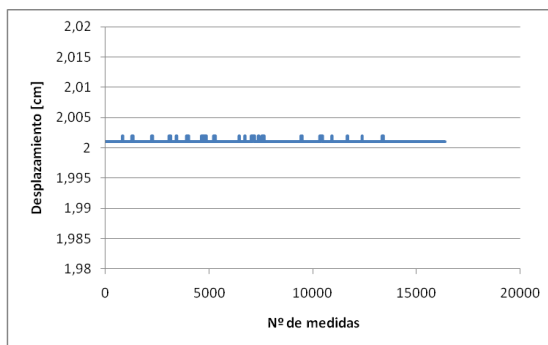
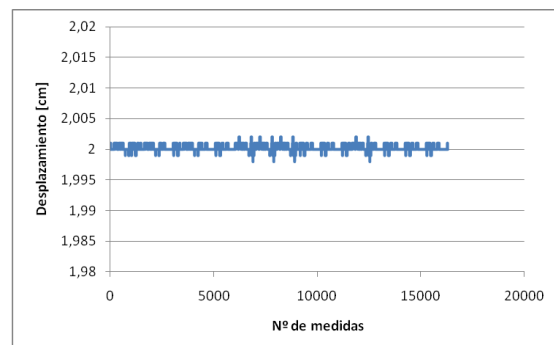
AMORTIGUADOR CONVENCIONAL**AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO**

Figura 6.17. Ensayo sobre terreno adoquinado a 40 Km/h y 5 V

En la tabla 6.3 se muestran los RMS correspondientes al amortiguador magneto-reológico para adoquinado a 40 Km/h en comparación con los del amortiguador convencional.

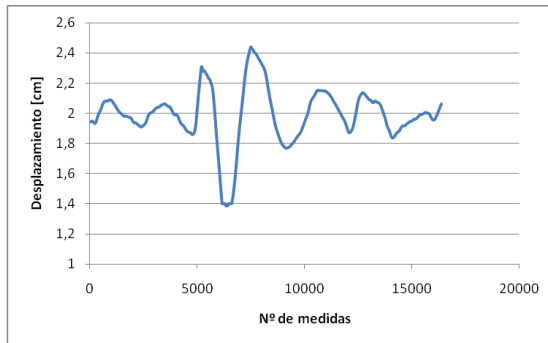
Tabla 6.3. RMS amortiguador magneto-reológico y convencional para adoquinado a 40 Km/h

RMS	0 V	1 V	2,5 V	5 V
Derecho	2,00029126	2,00027045	2,00022688	1,999
Izquierdo	2,00133569	2,00133569	2,00133569	2,00133569

6.3.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE ESCALÓN

En las figuras 6.18 a 6.21 se muestra la lectura de los sensores de desplazamiento obtenida en la suspensión delantera cuando se alimenta al amortiguador magneto-reológico a 0, 1, 2,5 y 5 V, respectivamente.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

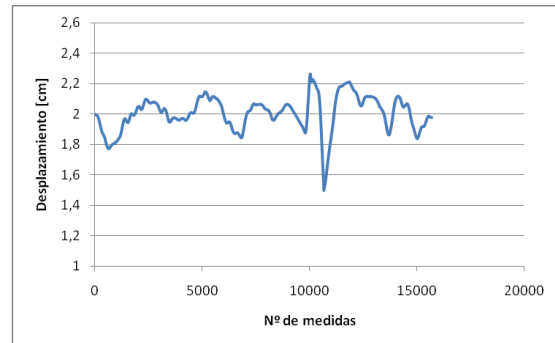
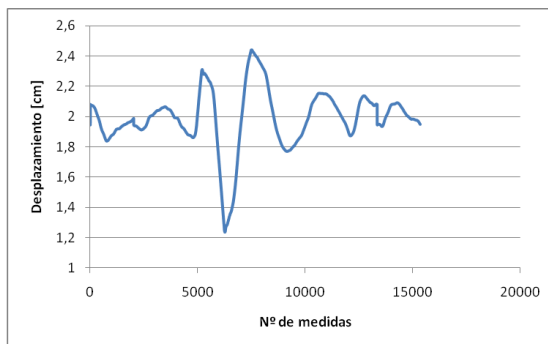


Figura 6.18. Ensayo sobre escalón a 0 V

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

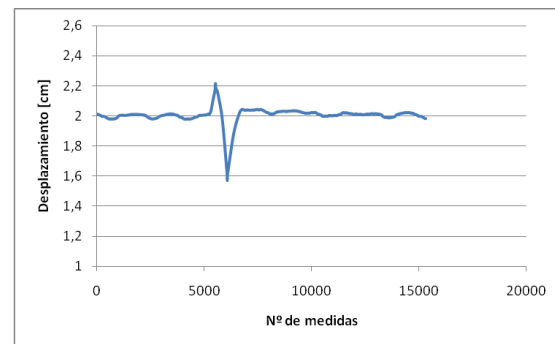


Figura 6.19. Ensayo sobre escalón a 1 V

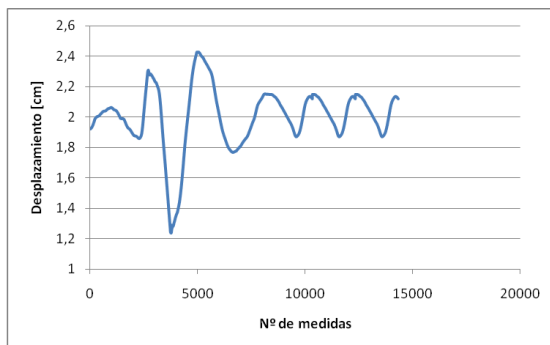
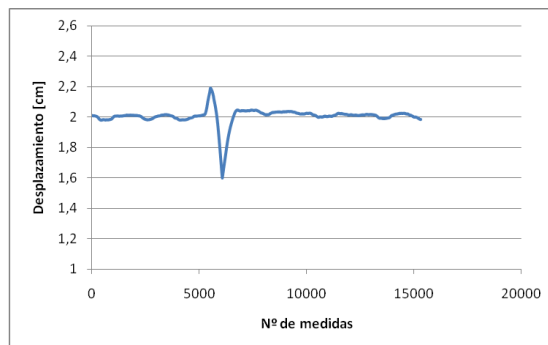
AMORTIGUADOR CONVENCIONAL**AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO**

Figura 6.20. Ensayo sobre escalón a 2,5 V

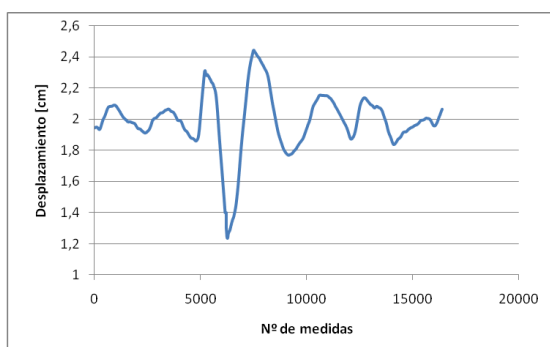
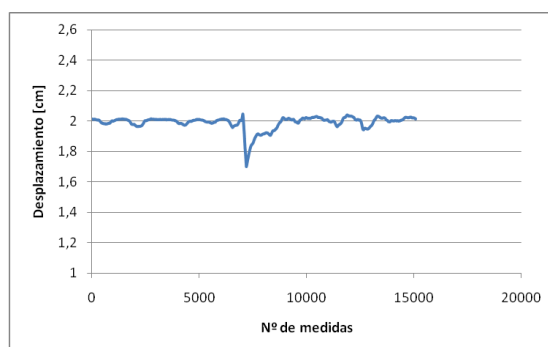
AMORTIGUADOR CONVENCIONAL**AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO**

Figura 6.21. Ensayo sobre escalón a 5 V

En la tabla 6.4 se muestran los RMS correspondientes al amortiguador magneto-reológico para escalón en comparación con los del amortiguador convencional.

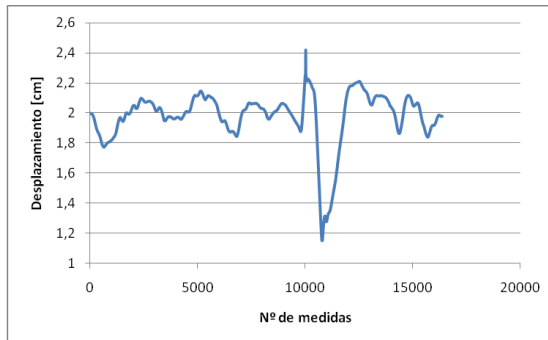
Tabla 6.4. RMS amortiguador magneto-reológico y convencional para escalón

RMS	0 V	1 V	2,5 V	5 V
Derecho	2,005094698	2,00493285	2,004876289	1,991782101
Izquierdo	1,989462891	1,986793832	2,002233092	1,987386047

6.3.5 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE BADÉN

En las figuras 6.22 a 6.25 se muestra la lectura de los sensores de desplazamiento obtenida en la suspensión delantera cuando se alimenta al amortiguador magneto-reológico a 0, 1, 2,5 y 5 V, respectivamente.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

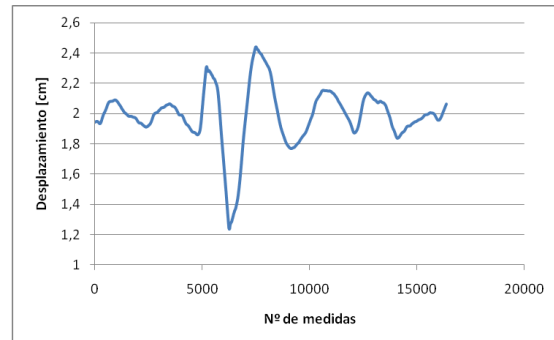
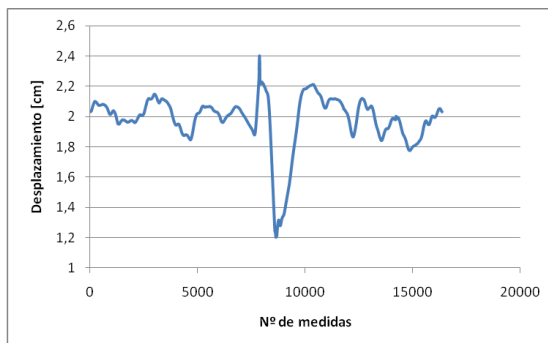


Figura 6.22. Ensayo sobre badén a 0 V

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

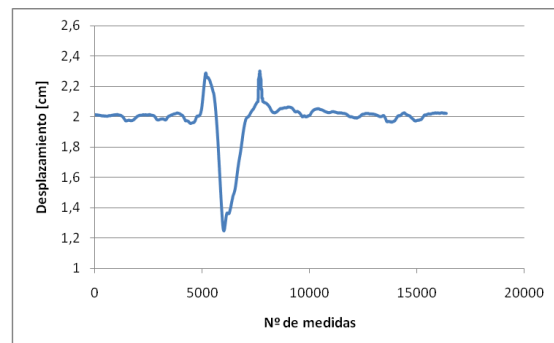


Figura 6.23. Ensayos sobre badén a 1 V

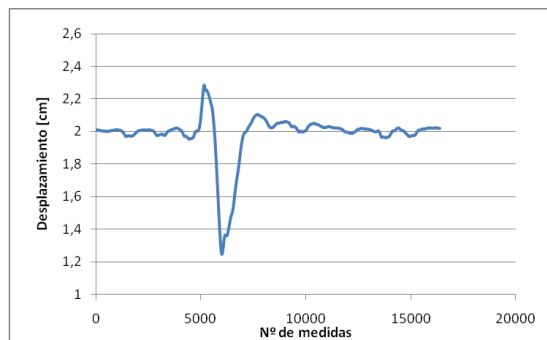
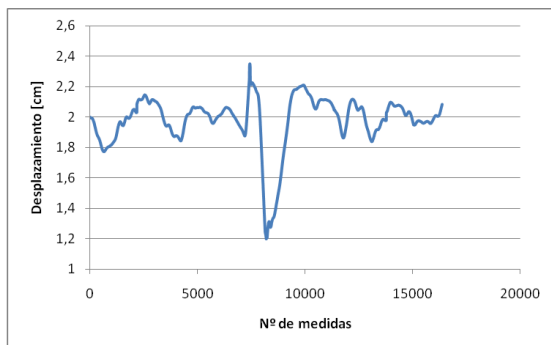
AMORTIGUADOR CONVENCIONAL**AMORTIGUADOR MAGNETO-
REOLÓGICO**

Figura 6.24. Ensayo sobre badén a 2,5 V

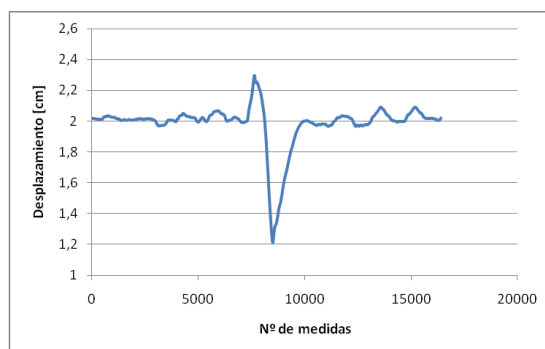
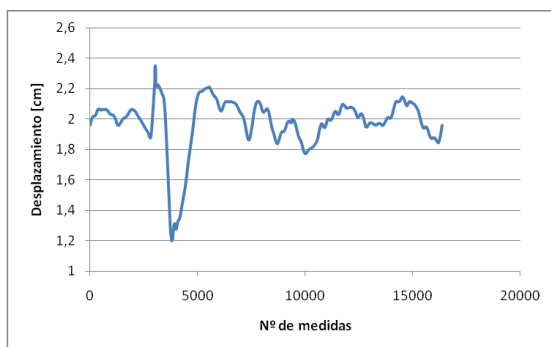
AMORTIGUADOR CONVENCIONAL**AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO**

Figura 6.25. Ensayo sobre badén a 5 V

En la tabla 6.5 se muestran los RMS correspondientes al amortiguador magneto-reológico para baden en comparación con los del amortiguador convencional.

Tabla 6.5. RMS amortiguador magneto-reológico y convencional para badén

RMS	0 V	1 V	2,5 V	5 V
Derecho	1,941945313	1,98549847	2,00994922	2,01689063
Izquierdo	1,97334375	1,97697107	1,97691461	1,97688512

En la tabla 6.6 se muestran los valores del RMS correspondientes al amortiguador magneto-reológico para cada valor de tensión suministrada a este en cada uno de los ensayos realizados en el presente proyecto.

Tabla 6.6. RMS del amortiguador magneto-reológico en los diferentes ensayos

RMS	0 V	1 V	2,5 V	5 V
Adoquinado 20 km/h	2,00027411	1,99938487	1,99928275	1,99919269
Adoquinado 30 km/h	2,00032776	1,99952846	1,999507	1,99949853
Adoquinado 40 km/h	2,00029126	2,00027045	2,00022688	1,999
Escalón	2,005094698	2,00493285	2,004876289	1,991782101
Badén	1,941945313	1,98549847	2,00994922	2,01689063

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

7.1 CONCLUSIONES

El objetivo del presente proyecto es estudiar el comportamiento de un vehículo automóvil equipado con un sistema de suspensión semiactiva basado en un amortiguación magneto-reológico modelo RD-1005.3.

Para realizar dicho estudio, se realizan diferentes ensayos sobre distintos terrenos, como son, terreno adoquinado, badén y escalón y así poder estudiar del comportamiento dinámico del vehículo al instalar el amortiguador magneto-reológico en la suspensión. A lo largo de los ensayos se ha ido variando la tensión del amortiguador magneto-reológico, tomando valores de 0, 1, 2.5 y 5 V.

Debido a la variación de voltaje ha sido posible conocer el distinto comportamiento de la suspensión del vehículo frente a diferentes situaciones. A su vez, se ha variado la velocidad del vehículo en los ensayos. En cuanto al terreno adoquinado la velocidad se ha variado entre 20, 30 y 40 km/h. En el ensayo de badén la velocidad se varía entre 15 y 20 km/h ya que presenta mucha dificultad conseguir una velocidad constante, al igual que en el ensayo de escalón que se intenta mantener una velocidad en torno a los 20 km/h. Con lo cual, con la variación de tensiones y velocidades citadas anteriormente ha sido posible estudiar el comportamiento del amortiguador en el mismo terreno.

Teniendo en cuenta que el amortiguador magneto-reológico instalado en la suspensión del vehículo para la realización de los diferentes ensayos fue fabricado para los asientos de vehículos de gran tonelaje, puede darse el caso que algunas medidas no sean estrictamente correctas, debido a que la carrera del vástago tiene muy poco recorrido y puede llegar al tope muestreando unos datos no del todo verdaderos.

Estudiando el RMS del amortiguador magneto-reológico obtenidos en el apartado 6.3, se puede observar que, según aumenta la tensión de este, es decir, a medida que se aumenta la dureza del amortiguador, los valores RMS correspondientes al amortiguador magneto-reológico disminuyen y, por lo tanto, aumenta la rigidez del amortiguador, esto significa que el desplazamiento experimentado por este disminuye. Por otro lado, a medida que se aumenta la velocidad del vehículo automóvil en un mismo terreno, los valores del RMS correspondientes al amortiguador magneto-reológico obtenidos también aumentan, es decir, que dicho amortiguador experimenta un mayor desplazamiento.

Por otro lado, en los ensayos de badén se obtiene el mismo comportamiento que sobre terreno adoquinado, es decir a medida que se aumenta la tensión del amortiguador magneto-reológico, los valores correspondientes del RMS disminuyen.

En cuanto a los datos del amortiguador convencional, obtenidos de igual manera en el apartado 6.3, se puede observar que son independientes de la variación de la tensión del amortiguador magneto-reológico, ya que su comportamiento se mantiene constante a lo largo de los ensayos. Cabe destacar que podría haber una influencia del comportamiento de uno de los lados del vehículo en el otro lado como consecuencia del movimiento balanceo. Gracias a estos resultados podemos llegar a la conclusión de que al obtener los mismos valores en el amortiguador convencional, este movimiento prácticamente no influye, hecho justificable por las bajas velocidades y pequeños obstáculos, y por lo tanto, se puede afirmar que los datos son correctos.

Por otro lado, cabe destacar, que entre los valores del RMS se obtienen datos atípicos, son los datos obtenidos en el ensayo sobre badén, en el cual el RMS va aumentando a medida que se aumenta la tensión del amortiguador magneto-reológico en lugar de disminuir. Esto puede ser debido por una variación de la velocidad al rebasar este obstáculo, ya que es prácticamente imposible mantener una velocidad constante según se rebasa el badén.

7.2 FUTUROS ESTUDIOS PROPUESTOS

Las diversas aplicaciones y propiedades de los fluidos reológicos adquieren una gran importancia dentro de la industria y de la automoción gracias al fuerte desarrollo que están experimentando dichos fluidos.

En el presente proyecto se ha estudiado el comportamiento de un amortiguador magneto-reológico en la suspensión delantera de un vehículo automóvil. Los futuros estudios que se pueden emprender a partir de este proyecto son:

- Un estudio más exhaustivo adaptando en el vehículo un amortiguador magneto-reológico fabricado específicamente para este y no utilizando el del asiento de un vehículo de gran tonelaje como ha sido el caso.
- Realizar un estudio adaptando el amortiguador magneto-reológico en la suspensión trasera del vehículo.
- A su vez, realizar un estudio adaptando este tipo de amortiguadores a la suspensión trasera y delantera ambas simultáneamente.

- Un estudio más avanzado del presente proyecto realizando ensayos sobre otros tipos de terrenos, al igual que realizar ensayos a mayor velocidad sobre carreteras.
- Ampliar la investigación sobre fluidos reológicos y darle más aplicaciones a la adaptación de elementos con este tipo de fluidos en los vehículos automóviles.

Anexo A

ESPECIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS

A.1. INTRODUCCIÓN

En este apartado se procede a detallar las especificaciones técnicas de cada equipo empleado en el desarrollo del presente proyecto. A continuación se detallan las especificaciones del amortiguador magneto-reológico objeto de estudio, así como las características de los equipos PXI de National Instruments empleados para la adquisición y tratamiento de datos.

A.2. CARACTERÍSTICAS DEL AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO RD-1005.3 DE LORD

El amortiguador RD-1005.3 es un tipo de amortiguador con fluido magneto-reológico fabricado por la empresa alemana Lord. En el interior del monotubo se le aplica al fluido un campo magnético que hace que varíe sus características. Las características de amortiguamiento del fluido incrementan con prácticamente infinita precisión y con un tiempo de respuesta de 25ms. Diseño de control simple, liso y funcionamiento silencioso, este tipo amortiguador es especialmente apropiado para aplicaciones de suspensión. En la tabla A.1 se incluyen las características más importantes del amortiguador magneto-reológico RD-1005.3 fabricado por la empresa Lord.

Tabla A.1. Características del amortiguador RD-1005.3 de Lord

Longitud en compresión	6,1 pulgadas (155mm)
Longitud en extensión	8,2 pulgadas (255mm)
Diámetro del amortiguador	1,63 pulgadas (41,4mm)
Diámetro vástago Shaft	0,39 pulgadas (10mm)
Peso	1,8 libras (800g)
Para la instalación del Pin	0,47 pulgadas (12mm)
Características eléctricas	
Amperios de salida	Máximo 2 amperios

Voltaje de salida	12 V DC
Resistencia Temperatura ambiente	5 ohm
Resistencia (a 160°F 71° C)	7 ohm
Fuerza del amortiguador (<i>peak to peak</i>)	
2 pulgadas/segundos 1 amperio	>500 libras (2224 N)
8 pulgadas/segundo 0 amperio	<150 libras (667 N)
Características mecánicas	
Mínima Fuerza de tensión	1000 libras (4448 N)
Máximo rango de operación	160°F (71° C)
Temperaturas límite de Almacenamiento	212°F a -40°F (100 °C a 40° C)
Durabilidad	2 millones de ciclos @ +/- 0,5 pulgadas (+/-13mm), 2 hercios con salida de corriente variable entre 0 y 0,8 amperios.
Tiempo de respuesta	< 25 ms – tiempo para alcanzar el 90% del máximo niveles desde 0 a 1 amperio con pasos de @ 2 pulgadas/segundo (51 mm/s)
Conector amortiguador (2 pin)	Cuerpo: Modelo 03-06-2023 Pins: Modelo 02-06-2103
Conector de unión (2pin)	Cuerpo: Modelo 03-06-1023 Pins: Modelo 02-06-1103

En la figura A.1 se muestra una gráfica que muestra fuerza (N) frente a velocidad (m/s) del amortiguador magneto-reológico RD-1005.3 de Lord.

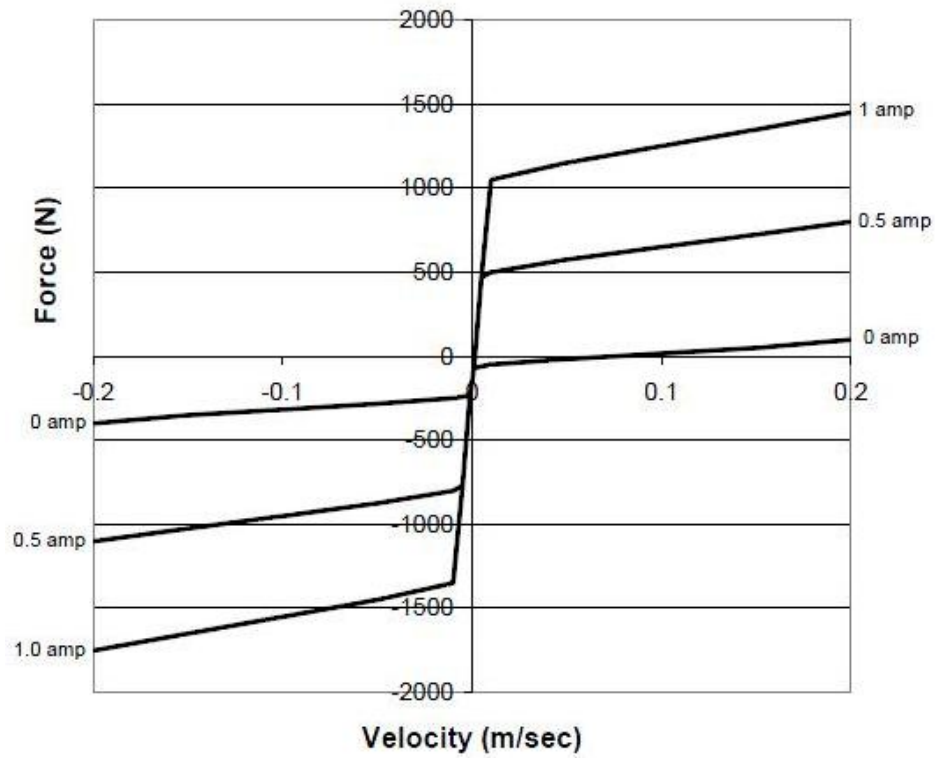


Figura A.1. Gráfica Fuerza vs Velocidad del amortiguador RD-1005.3

La figura A.2 muestra las vistas y medidas del amortiguador magneto-reológico objeto de estudio.

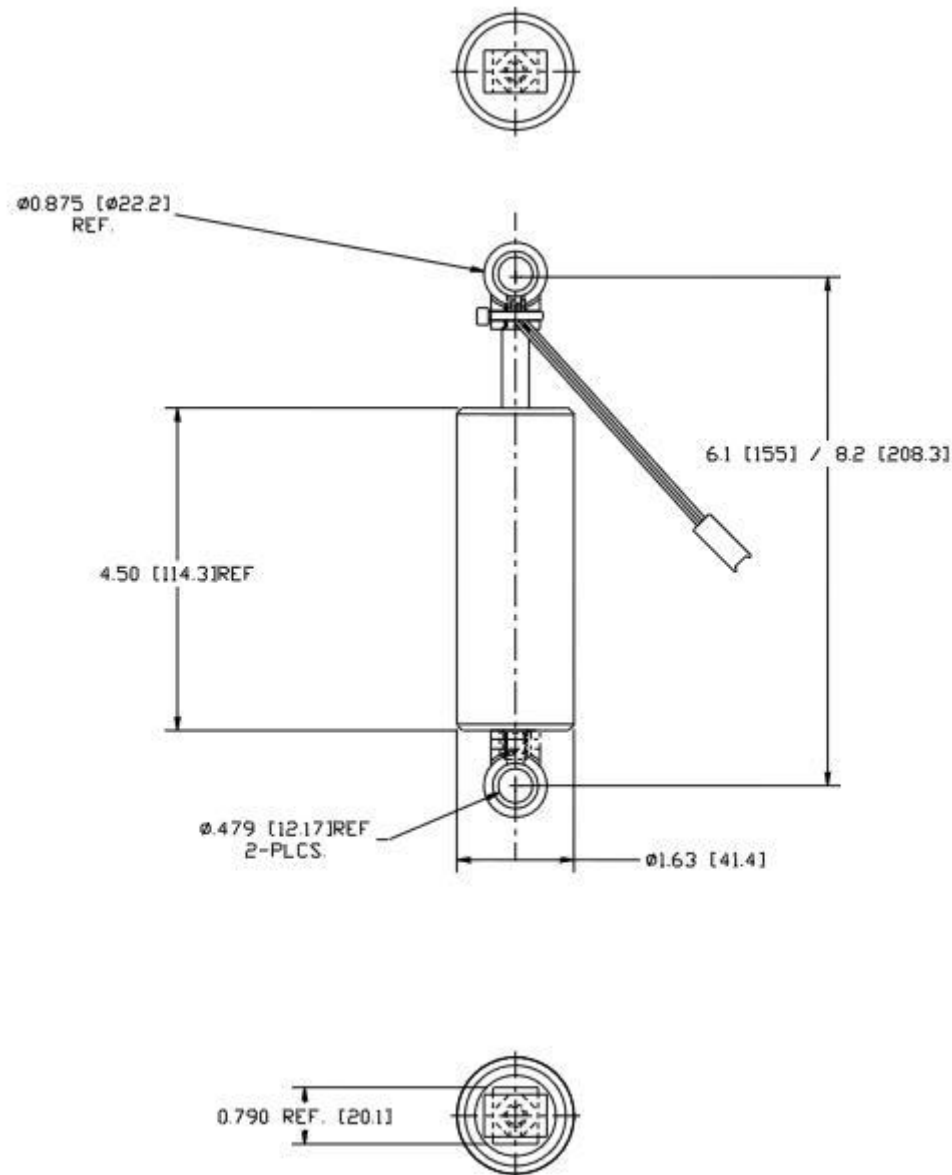


Figura A.2. Vistas y medidas del amortiguador magneto-reológico

A.3 ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS NATIONAL INSTRUMENTS

A continuación se detallan las especificaciones de los equipos de National Instruments. Como se comentó en el capítulo 4, el equipo NI PXI 1031 DC consiste en un chasis portátil con cuatro ranuras. Por otro lado, los módulos NI PXI 6230 y NI PXI 4472 B ya se comentó que consisten en tarjetas de adquisición de datos.

A.3.1 ESPECIFICACIONES DE NI PXI 1031 DC

Electrical

AC Input

Input voltage range	100 to 120 VAC/200 to 240 VAC
Operating voltage range	90 to 132 VAC/180 to 264 VAC
Input frequency	50/60 Hz
Operating frequency range	47 to 63 Hz
Input current rating	4 to 2 A
Overcurrent protection	6.3 A fuse in power supply (no user-serviceable components inside)
Efficiency	65% minimum

DC Input

Input voltage range	11 to 30 VDC
Input current rating	30 A maximum
Efficiency	65% typical

DC Output

DC Current Capacity (I_{MAP} , 0 to 50° C)

Voltage (V)	Current (A)
+3.3	12
+5	17
+12	2
-12	0.8

Notes

¹For AC-powered applications and DC applications above 12.3 V input, the combined loading must not exceed 145.6 W.

²For AC/DC applications, the combined loading on the +5 and +3.3 VDC must not exceed 112 W.

³For DC-powered applications, at 11 VDC input the combined loading on +5, +3.3, +12, and -12 VDC must not exceed 137 W. At 12.3 VDC or higher input, the combined loading must not exceed 145.6 W.

⁴For DC applications, the output power is derated 5 W/°C above 45 °C.

⁵National Instruments does not guarantee measurement accuracy for brief periods when switching between AC and DC input.

Chassis Cooling

Per-slot cooling capacity	25 W
Fan	86 cfm

Acoustic Emissions

Sound pressure level (at operator's position)

(tested in accordance with ISO 7779)

Auto Fan (at 25 °C ambient)	45.5 dBA
High Fan	49.4 dBA

Sound Power

(tested in accordance with ISO 7779)

Auto Fan (at 25 °C ambient)	54.3 dBA
High Fan	58.2 dBA

Environmental

Operating location	Indoors
Altitude	2,000 m
Installation category	II
Pollution degree	2

Operating Environment

Operating temperature	0 to 50 °C (tested in accordance with IEC-60068-2-1 and IEC-60068-2-2)
Relative humidity	10 to 90% (tested in accordance with IEC-60068-2-56)

Storage Environment

Ambient temperature.....	-20 to 70 °C (tested in accordance with IEC-60068-2-1 and IEC-60068-2-2)
Relative humidity.....	5 to 95%, noncondensing (tested in accordance with IEC-60068-2-56)

Shock and Vibration

Operational shock.....	30 g peak, half-sine, 11 ms pulse (tested in accordance with IEC-60068-2-27; test profile developed in accordance with MIL-PRF-28800F)
Relative humidity.....	5 to 95%, noncondensing (tested in accordance with IEC-60068-2-56)

Random Vibration

Operating	5 to 500 Hz, 0.3 g _{rms}
Nonoperating	5 to 500 Hz, 2.4 g _{rms} (tested in accordance with IEC-60068-2-64; nonoperating profile exceeds the requirements of MIL-PRF-28800F, Class 3)

Mechanical

Overall dimensions (standard chassis)	
Height	177 mm (6.97 in.)
Width	257.1 mm (10.12 in.)
Depth	212.8 mm (8.38 in.)
Weight	5.0 kg (11.0 lb)

A.3.2 ESPECIFICACIONES DE NI PXI 4472 B

Specifications

Typical for 25 °C unless otherwise noted.

Analog Input

Channel Characteristics

Number of channels

NI 4472 Series 8, simultaneously sampled

NI 4474 Series 4, simultaneously sampled

Input configuration Unbalanced differential

Resolution 24 bits, nominal

Type of ADC Delta-sigma

Oversampling, for sample rate (f_s):1.0 kS/s $\leq f_s \leq 51.2$ kS/s 128 f_s 51.2 kS/s $< f_s \leq 102.4$ kS/s 64 f_s Sample rates (f_s) 1.0 to 102.4 kS/s in 190.7 μ S/s increments for $f_s > 51.2$ kS/s or 95.36 μ S/s increments for $f_s \leq 51.2$ kS/sFrequency accuracy ± 25 ppmInput signal range ± 10 V peak

FIFO buffer size 1,024 samples

Data transfers DMA

Transfer Characteristics

Offset (residual DC) ± 3 mV, maxGain (amplitude accuracy) ± 0.1 dB, max, $f_{in} = 1$ kHz

Amplifier Characteristics

Input impedance (ground referenced)

Positive input 1 M Ω in parallel with 60 pFNegative input (shield) 50 Ω in parallel with 0.02 μ FFlatness (relative to 1 kHz) ± 0.1 dB, DC to 0.4535 f_s , max, DC-coupled-3 dB bandwidth 0.4863 f_s

Input coupling AC or DC, software-selectable

AC -3 dB cutoff frequency

NI 4472, NI 4474 3.4 Hz

NI 4472B 0.5 Hz

Overvoltage protection

Positive input ± 42.4 V

Positive inputs protected CH<0..7>

Negative input (shield) Not protected, rated at ± 2.5 V

Common-mode rejection ratio (CMRR)

 $f_{in} < 1$ kHz > 60 dB, minimum

Dynamic Characteristics

Alias-free bandwidth (passband) DC (0 Hz) to 0.4535 f_s Stop band 0.5465 f_s

Alias rejection 110 dB

Spurious-free dynamic range 130 dB, 1.0 kS/s $\leq f_s \leq 51.2$ kS/s118 dB, 51.2 kS/s $< f_s \leq 102.4$ kS/s THD, $f_{in} = 1$ kHz0 dBFS input < -90 dB20 dBFS input < -100 dB60 dBFS input < -60 dBIMD < -100 dB (CCF 14 kHz + 15 kHz)Crosstalk¹ (channel separation), $f_{in} = 0$ to 51.2 kHz

Between channels 0 and 1, 2 and 3, 4 and 5, or 6 and 7

Shorted input < -90 dB1 k Ω load < -80 dB

Other channel combinations

Shorted input < -100 dB1 k Ω load < -90 dBPhase linearity ± 0.5 degInterchannel phase mismatch $< f_{in}$ (in kHz) $\times 0.018$ deg + 0.082 degInterchannel gain mismatch ± 0.1 dB

Filter delay through ADC 38.8 sample periods

Onboard Calibration Reference

DC level 5.000 V ± 2.5 mVTemperature coefficient ± 5 ppm/ $^{\circ}$ C maximumLong-term stability ± 20 ppm/V/1,000 h

Signal Conditioning

Constant current source (software-controlled)

Current 4 mA, $\pm 5\%$

Compliance 24 V

Output impedance > 250 k Ω at 1 kHzCurrent noise < 500 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$

Triggers

Analog Trigger

Source CH<0..7>

Level -10 to +10 V, full scale, programmable

Slope Positive or negative (software-selectable)

Resolution 24 bits, nominal

Hysteresis Programmable

Digital Trigger

Compatibility 5 V TTL/CMOS

Response Rising or falling edge

Pulse width 10 ns, minimum

Bus Interface

Type Master, slave

Power Requirements

+3.3 VDC

PXI 400 mA, maximum

+5 VDC

PCI 2.6 A, maximum

PXI 2.2 A, maximum

+12 VDC 120 mA, maximum

-12 VDC 120 mA, maximum

A.3.3 ESPECIFICACIONES DE NI PXI 6230

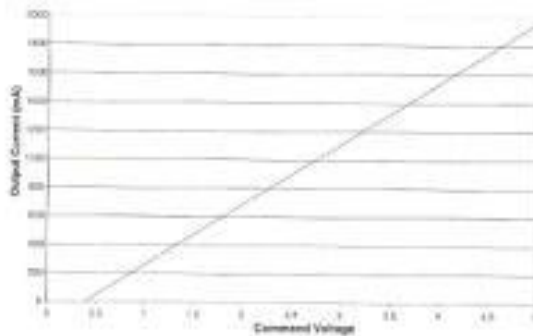
Specifications listed below are typical at 25 °C unless otherwise noted.

Analog Input	
Number of channels	4 differential or 8 single ended
Channel type	Voltage input
ADC resolution	16 bits
DNL	No missing codes guaranteed
INL	Refer to the AI Absolute Accuracy Table
Sampling rate	
Maximum	250 KS/s
Minimum	0 S/s
Timing accuracy	50 ppm of sample rate
Timing resolution	50 ns
Input coupling	DC
Input range	$\pm 10\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$, $\pm 1\text{ V}$, $\pm 0.2\text{ V}$
Maximum working voltage for analog inputs	Refer to the Maximum Working Voltage section
CMRR (DC to 60 Hz)	95 dB (with respect to AI GND)
Input impedance	
Device on	
AI+ to AI GND	$>10\text{ G}\Omega$ in parallel with 100 pF
AI- to AI GND	$>10\text{ G}\Omega$ in parallel with 100 pF
Device off	
AI+ to AI GND	820 Ω
AI- to AI GND	820 Ω
Input bias current	$\pm 100\text{ pA}$
Crosstalk (at 100 kHz)	
Adjacent channels	-75 dB
Non-adjacent channels	-90 dB
Small signal bandwidth (-3 dB)	700 kHz
Input FIFO size	4,095 samples
Scan list memory	4,095 entries
Data transfers	DMA (scatter-gather), interrupts, programmed I/O
Overvoltage protection (AI <0..7> with respect to AI GND)	
Device on	$\pm 25\text{ V}$ for up to two AI pins
Device off	$\pm 15\text{ V}$ for up to two AI pins
Input current during overvoltage condition	$\pm 20\text{ mA}$ max/AI pin
Settling Time for Multichannel Measurements	
Accuracy, full scale step, all ranges	
$\pm 90\text{ ppm}$ of step ($\pm 6\text{ LSB}$)	4 μs convert interval
$\pm 30\text{ ppm}$ of step ($\pm 2\text{ LSB}$)	5 μs convert interval
$\pm 15\text{ ppm}$ of step ($\pm 1\text{ LSB}$)	7 μs convert interval

A.4 ESPECIFICACIONES DEL KIT CONTROLLER

LORD USER INSTRUCTIONS

Typical Performance, 4 ohm load



Performance graph should not be used for control or design purposes.

The tables below indicate typical performance using the supplied power supply. When utilizing the Wonder Box device controller kit in a control circuit, it is recommended that the user measure the exact voltage to current relationship in their application.

Input Voltage	Output Current (4 ohm)
-0.4-0.6 V	0 mA
2 V	750 mA
4.3 V	1800 mA

Input Voltage	Output Current (8 ohm)
-0.4-0.6 V	0 mA
1.6 V	600 mA
3.2 V	1300 mA

Values stated in these instructions represent typical values as not all tests are run on each lot of material produced. For formalized product specifications for specific product and uses, contact the Customer Support Center.

Information provided herein is based upon tests believed to be reliable. In as much as LORD Corporation has no control over the manner in which others may use this information, it does not guarantee the results to be obtained. In addition, LORD Corporation does not guarantee the performance of the product or the results obtained from the use of the product or this information where the product has been repackaged by any third party, including but not limited to any product end-user. Nor does the company make any express or implied warranty of merchantability or fitness for a particular purpose concerning the effects or results of such use.

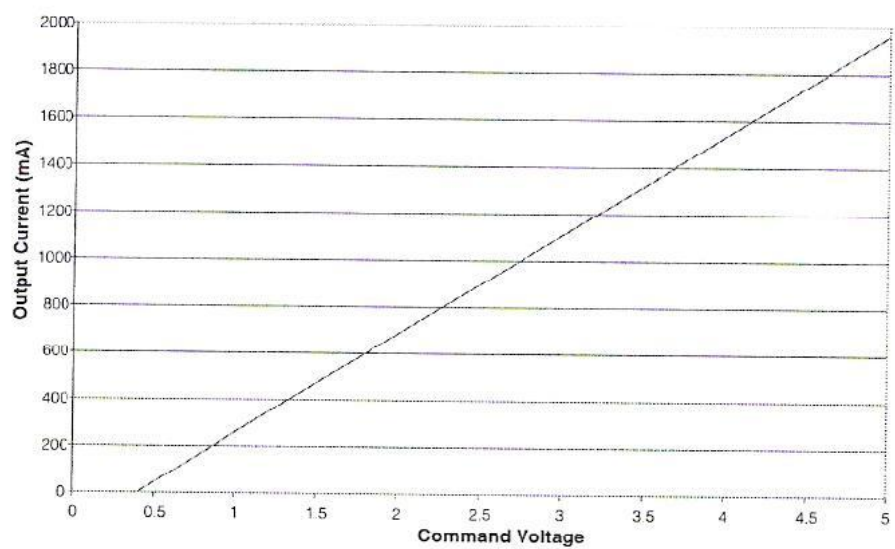
Wonder Box and "Ask Us How" are trademarks of LORD Corporation or one of its subsidiaries.

LORD provides valuable expertise in adhesives and coatings, vibration and motion control, and magnetically responsive technologies. Our people work in collaboration with our customers to help them increase the value of their products. Innovative and responsive in an ever-changing marketplace, we are focused on providing solutions for our customers worldwide... Ask Us How.

LORD Corporation
World Headquarters
 111 Lord Drive
 Cary, NC 27511-7923
 USA
Customer Support Center
 +1 877 ASK LORD (275 5673)
 www.lord.com

©2008 LORD Corporation. CC-137700 (Rev.0 5/08)

LORD
 Ask Us How™



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Arias Paz, Manuel. “Manual de automóviles”. FEBRERO 2004. Cie Dossat 2000 S.L.
- [2] Información general de la suspensión. 2010.
http://www.mecanicavirtual.org/indice_cursos.html#suspension
- [3] FERNÁNDEZ CASAS, Raúl. “**Modelado de un sistema de suspensión de un vehículo automóvil mediante Simmechanics**”. Directora: M^a Jesús López Boada. Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica. 2008.
- [4] Sistema de suspensión. Elementos del automóvil. Cevimap. 2010.
<http://www.mapfre.com/ccm/content/documentos/cevimap/ficheros/CFElemAmoviblesExtracto.pdf>
- [5] LUQUE, P., ÁLVAREZ, D., y VERA, C.: “Ingeniería del automóvil”. Editorial Thomson, 2004.
- [6] Juan Alberdi Urbieto. Manuales de automoción. Universidad de Navarra. Enero de 2003.
<http://www.tecnun.es/automoción/>
- [7] MULA VIVERO, Iván. “Estudio del comportamiento dinámico de un vehículo utilizando la herramienta simmechanics de matlab” Directora: Dra. María Jesús López Boada. Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica. 2009.
- [8] Tipos de suspensiones 2010.
<http://www.automovilistas-chile.cl/forum/topic.asp>
- [9] PICHARDO, Juan Manuel. Tipos de suspensión independiente. 2010.
<http://www.km77.com/tecnica/bastidor/clasificacion-suspension/t01.asp>

- [10] CORONEL BENAVENTE, Diego. “Montaje y estudio de un amortiguador magneto-reológico en la suspensión de un vehículo automóvil” Directora: Dra. María Jesús López Boada. Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica. 2010.
- [11] LÓPEZ FERNÁNDEZ, David. “Montaje y estudio de un amortiguador magneto-reológico RD 1005.3 en la suspensión de un vehículo automóvil” Directora: Dra. María Jesús López Boada. Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica. 2010.
- [12] CUPICH RODRÍGUEZ, M. y ELIZONDO GARZA, F. J. *Amortiguadores magneto-reológicos*. V Congreso Mexicano de Acústica. 1998.
- [13] OVIEDO GUTIÉRREZ, Diego. “Optimización del modelo Bouc-Wen de un amortiguador magneto-reológico mediante algoritmos genéticos”. Directora: Dra. María Jesús López Boada y Dra. Beatriz López Boada. Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Mecánica. 2010.
- [14] LÓPEZ GARCÍA, Oscar, CARNICERO LÓPEZ, Alberto, RUIZ PABLOS, Rosa. *Materiales inteligentes (II): Aplicaciones tecnológicas anales de mecánica y electricidad*.
- [15] Fundación de EROSKI, versión *online* de la revista CONSUMER EROSKI. Tipos de amortiguador. Fecha de publicación 18 de diciembre de 2006. Enlace web:
http://www.consumer.es/web/es/motor/mantenimiento_automovil/2006/12/18/158250.php
- [16] Autocity.com *MagneRide* de Delphi. 2009. Enlace web:
<http://www.autocity.com/documentos-tecnicos/index.html?cat=3&codigo%20Doc=210>
- [17] Web oficial de Lord. 2010. Enlace web:
[http://www.lord.com/Products-and-Solutions/Magneto-Rheological-\(MR\).xml](http://www.lord.com/Products-and-Solutions/Magneto-Rheological-(MR).xml)
- [18] MATELLANES, Lina, CUEVAS, J.M^a, CLEMENTE, Raquel y ALLUÉ, Sandra. Materiales y estructuras “inteligentes”. Centro tecnológico y Gaike. 2003.
<http://www.interempresas.net/PrimeraPagina/Articulos/2971-Materiales-y-estructuras-inteligentes.html>
- [19] Página Web Oficial National instruments. 2010. Enlace Web:

<http://www.ni.com>

- [20] Información sobre amortiguadores BILSTEIN. *Applied Measurements LTD. Transducer Specialists*. 2010. Enlace Web:

<http://www.appmeas.co.uk/aml-ie-industrial-lvdt-displacement-sensor.html>

- [21] Web oficial de Lord. 2010. Enlace web:

<http://www.lord.com>